I GRANDI MISTERI DELL'UNIVERSO

I GRANDI MISTERI DELL'UNIVERSO

Luna: come si è formato il nostro satellite

Riusciremo mai a visitare altri pianeti del Sistema Solare?

Viviamo l'unica realtà possibile o siamo parte di un multiverso?

Entreremo in contatto con qualche forma di vita aliena?

DAI BUCHI NERI ALLE GALASSIE PIÙ REMOTE

TUTTO QUELLO CHE C'È DA SAPERE PER COMPRENDERE IL COSMO E LE SUE MERAVIGLIE

Esistono la materia oscura e l'energia oscura?

Cosa c'era prima del Big Bang?

Sprea EDITORI

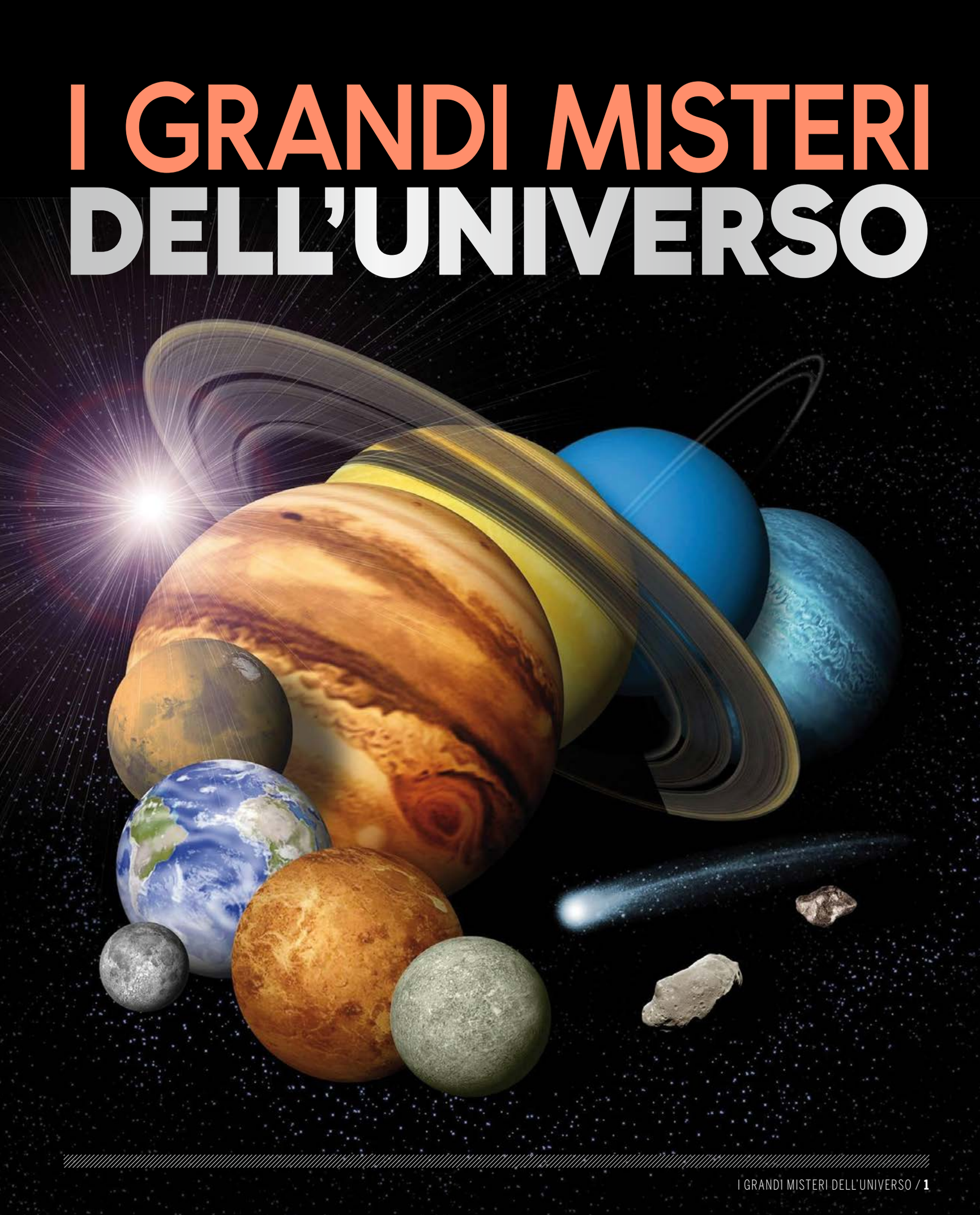
È IN EDICOLA

ANCHE IN VERSIONE DIGITALE A 4,90€

Acquista la tua copia su www.sprea.it/sistemasolare

Scansiona il QR Code

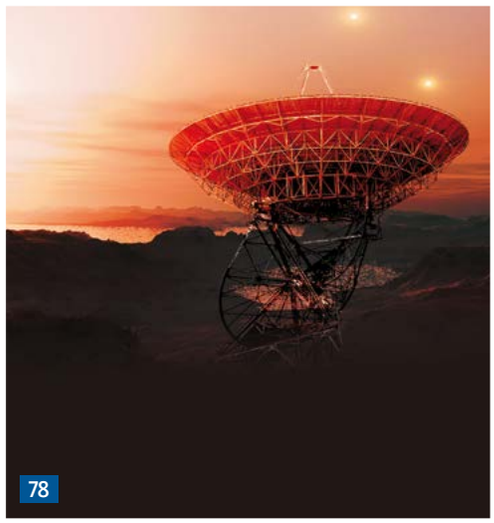
I GRANDI MISTERI DELL'UNIVERSO



SOMMARIO

I GRANDI MISTERI DELL'UNIVERSO

Un viaggio al confine tra il certo e l'incerto tra le affascinanti frontiere della scienza



COME È NATO L'UNIVERSO 4
Ecco come una gigantesca esplosione, il Big Bang, ha dato origine a "tutto"

LA STORIA DELL'UNIVERSO 12
Dagli inizi e ciò che accadrà in futuro

DALLE NEBULOSE ALLE STELLE 14
Come nascono e come muoiono. Il destino (segnato) della nostra stella: il Sole

I GIGANTI CHE ABITANO IL CIELO 22
Di quali strutture è composto l'Universo? Come sono distribuite nello Spazio?

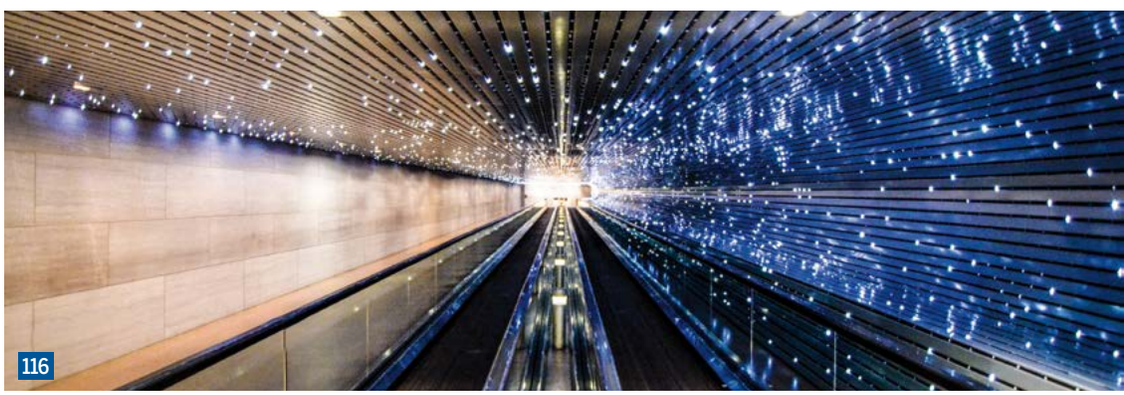
LA NASCITA DEL SISTEMA SOLARE 36
L'avventurosa "storia" dei pianeti che "danzano" attono al Sole

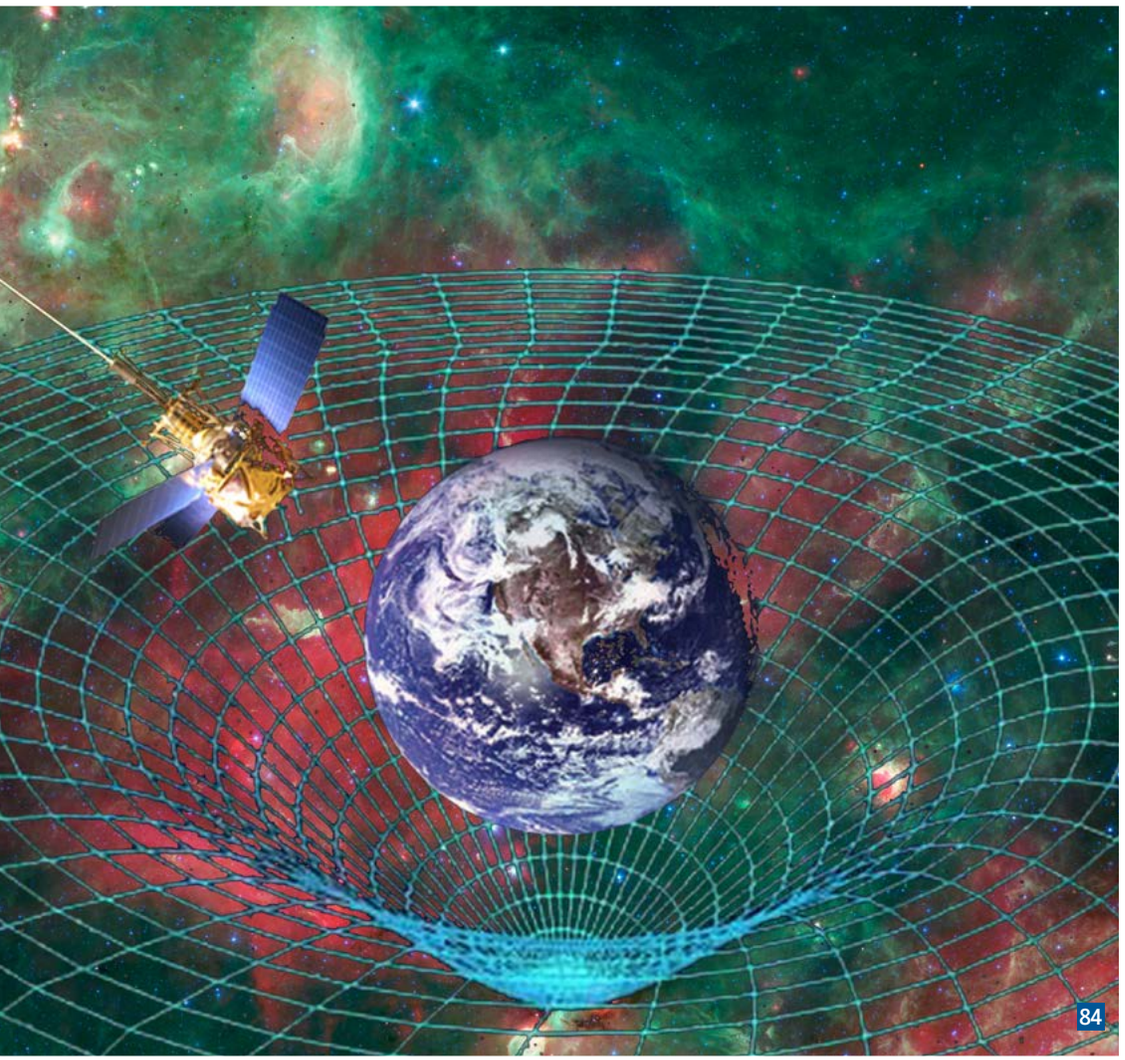
L'ORIGINE DEL SISTEMA TERRA-LUNA 46
Le ipotesi più accreditate sulla formazione di una coppia davvero "solida"

LA RICERCA DEL PIANETA X 54
Non riusciamo ancora a vederlo, ma molti indizi sembrano confermarne l'esistenza

L'ENIGMA IRRISOLTO DEI BUCHI NERI 58
Gli ingordi "mostri" che divorano qualsiasi cosa passi nelle loro vicinanze

ALLA RICERCA DI UNA SUPERTERRA 70
A caccia di un pianeta simile al nostro al di fuori del Sistema Solare





TESTI: *Emiliano Ricci*

È giornalista, divulgatore scientifico e scrittore. È laureato in fisica con orientamento astrofisico e dottore di ricerca (Ph.D.) in Telematica e Società dell'Informazione. Ha collaborato con quotidiani, mensili e riviste di settore astronomico, oltre che alla realizzazione di enciclopedie e di opere a fascicoli dedicate all'astronomia. Ha all'attivo diverse pubblicazioni divulgative sia di fisica sia di astronomia, fra cui: "*Osservare il cielo*" (Giunti, 2009), "*I viaggi dell'Orsa Maggiore*" (Scienza Express, 2011), "*La fisica in casa*" (Giunti, 2013, 2a ed.), "*La fisica fuori casa*" (Giunti, 2013) e altri.

REVISIONE E RICERCA ICONOGRAFICA: *Lucia Mazzilli*

È una giornalista. Ha lavorato alla rivista "*L'Astronomia*" arrivando a rivestire il ruolo di direttore.

ET: IL FASCINO DI MONDI LONTANI 78
Esistono altre forme di vita nell'Universo? Ce lo diranno i potentissimi radiotelescopi

QUANTO È GRANDE L'UNIVERSO? 84
È infinito o ha una dimensione calcolabile? Il dilemma e le ipotesi dei cosmologi

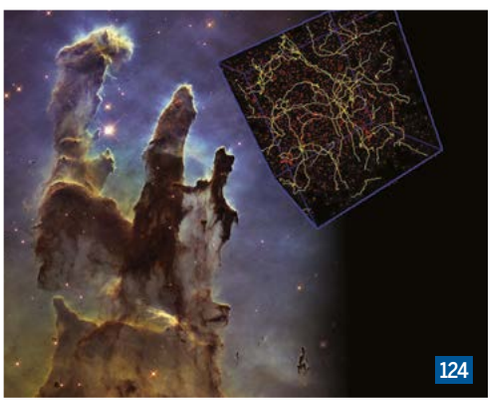
ALLA RICERCA DELLA MATERIA PERDUTA 94
Perché nell'Universo c'è molta più materia rispetto all'antimateria?

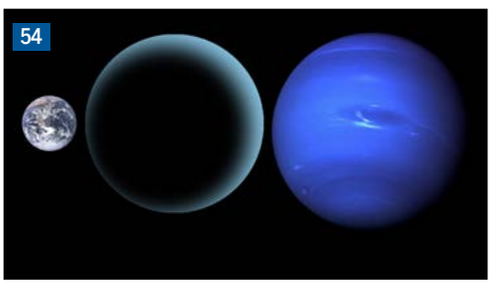
ESISTE LA MATERIA OSCURA? 102
Ne riconosciamo le tracce, ma nessuna prova sperimentale è riuscita a trovarla

UNA STRANA ENERGIA 110
Che cos'è l'energia oscura? Scenari affascinanti e indagini in corso

VIVIAMO IN UN MULTIVERSO? 116
Dalla fantascienza alla scienza, in viaggio verso dimensioni parallele

PRIMA DEL BIG BANG 124
E se tutto fosse iniziato ancora prima in un mare di vuoto agitato da piccole onde?





Il Big Bang in una elaborazione computerizzata che offre un'idea della gigantesca esplosione che diede origine all'Universo

COM'È NATO L'UNIVERSO

Da decenni gli scienziati si domandano come tutto abbia avuto inizio. Di teorie ne sono state elaborate molte, ma la più accreditata è quella del Big Bang, la colossale esplosione. Vediamo di cosa si tratta

Il primo a formulare una teoria sull'origine dell'Universo che prevedesse un'esplosione primordiale fu l'astronomo e sacerdote belga Georges Lemaître, nel 1927. L'ipotesi di Lemaître prevedeva che l'Universo fosse nato dalla grande esplosione di un "atomo primordiale", le cui dimensioni dovevano essere

123RF

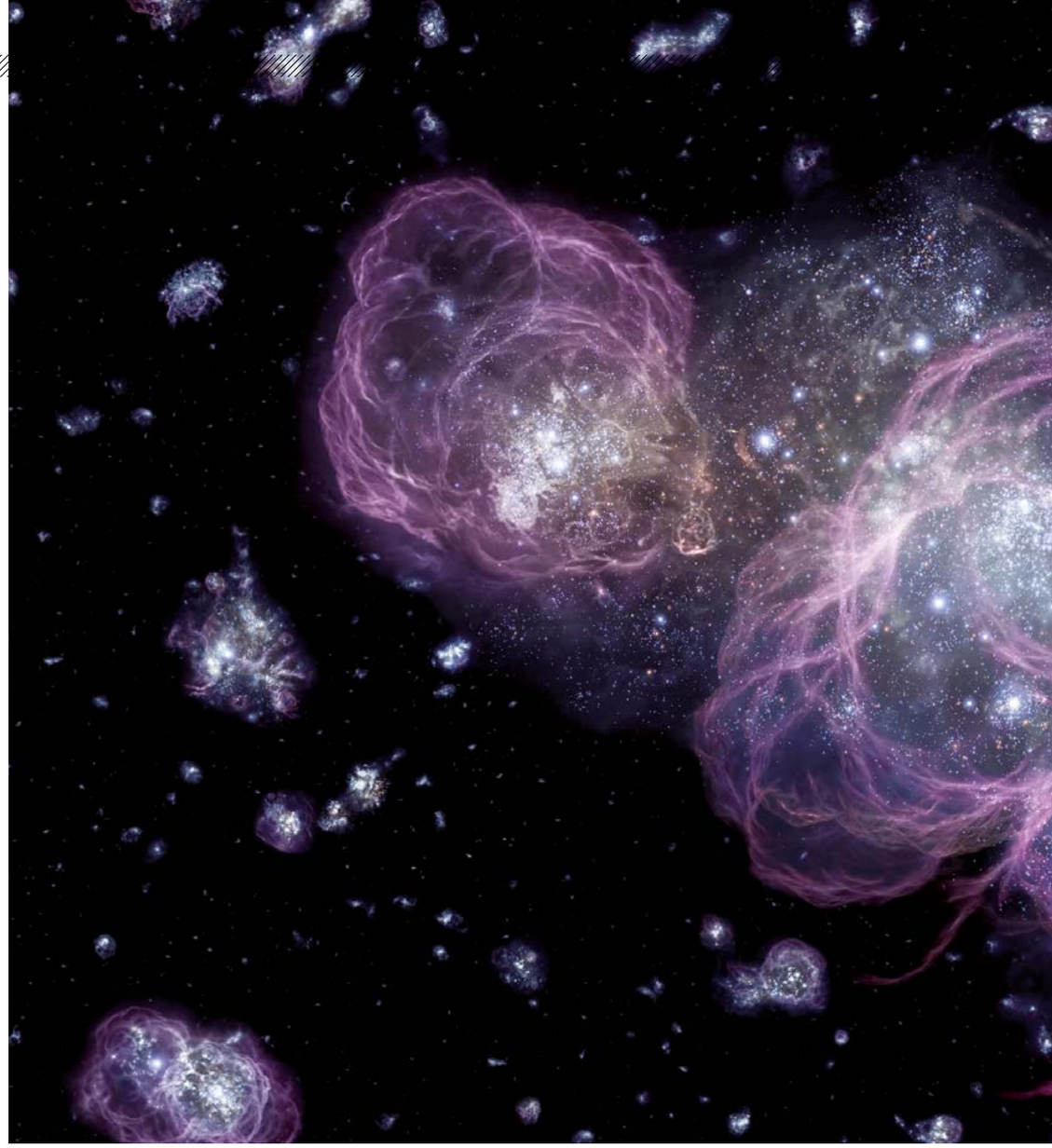
Geoge Gamow (1904-1968) in una fotografia del 1961. Fisico e cosmologo si occupò di diversi argomenti scientifici tra i quali l'origine dell'Universo. Condusse anche un'intensa attività divulgativa

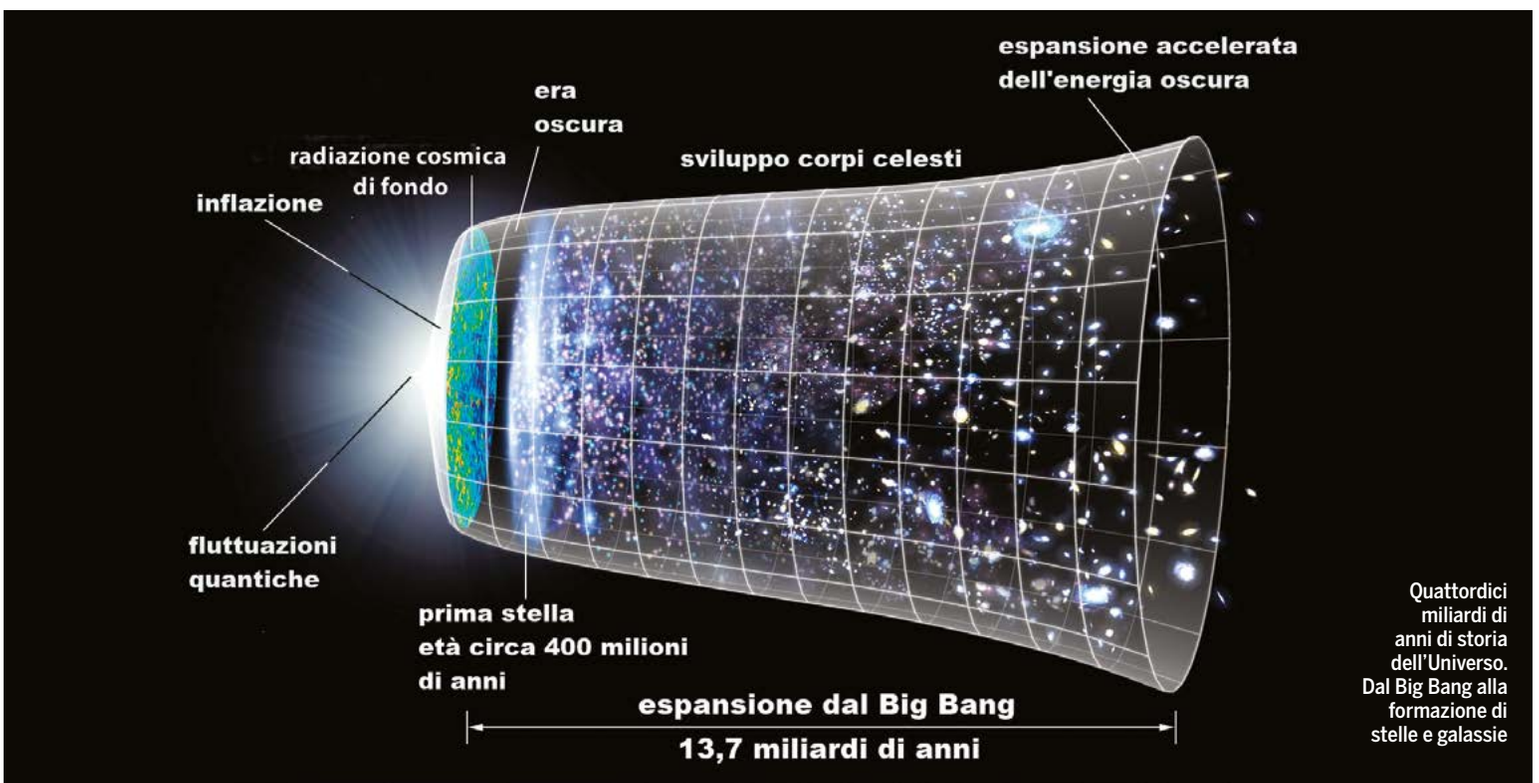
Associated Press

paragonabili a quelle dell'orbita terrestre e al cui interno era concentrata tutta la materia cosmica.
L'ipotesi dell'esplosione di un "atomo primordiale" venne in una certa misura ripresa dal fisico russo (naturalizzato statunitense) George Gamow, che, nel 1948, formulò la sua teoria sull'origine dell'Universo prevedendo un "grande scoppio" da cui si sarebbe avviata la nucleosintesi primordiale, ovvero la creazione dei primi nuclei atomici.
All'epoca, tuttavia, per quanto il modello di Gamow fosse del tutto coerente dal punto di vista fisico e matematico, non esisteva alcuna prova sperimentale della sua validità. L'allontanamento reciproco delle galassie, scoperto nel 1929 dall'astronomo statunitense Edwin Hubble, e interpretato come un moto collettivo di espansione dell'Universo, era certamente in accordo con la teoria del Big Bang, ma non ne rappresentava una prova sufficiente. Mancava soprattutto all'appello l'osservazione della radiazione cosmica di fondo, prevista appunto dal modello di Gamow, che rappresenterebbe la lontana eco dell'esplosione primordiale. Oltre a ciò, la teoria del Big Bang non era capace di spiegare l'esistenza degli

COME È NATO L'UNIVERSO

Monsignor Georges Lemaître (1894-1966), fisico e astronomo belga, fu il primo studioso a ipotizzare che l'origine dell'Universo fosse una gigantesca esplosione di un atomo primigenio





Quattordici miliardi di anni di storia dell'Universo. Dal Big Bang alla formazione di stelle e galassie

Commons. Adolf Schaller/STScI. NASA

Le indagini del Telescopio Spaziale Hubble hanno confermato che l'Universo ha creato la maggior parte delle sue stelle solo poche centinaia di milioni di anni dopo il Big Bang. Sebbene la formazione stellare sia ancora in atto nelle galassie, la percentuale di natalità è irrisoria rispetto al torrente impetuoso di stelle che caratterizzò quei primi anni

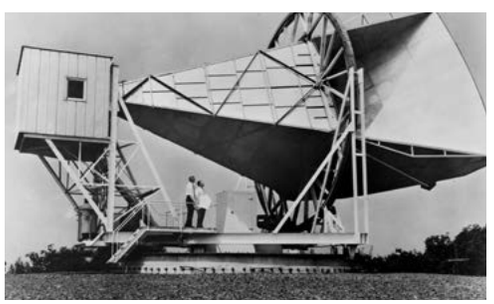
elementi pesanti, dei quali i pianeti e noi stessi siamo costituiti.
Paradossalmente, fu proprio uno dei principali antagonisti della teoria del Big Bang, il fisico, matematico e astronomo Fred Hoyle a comprendere, nel 1957, che la sintesi degli elementi pesanti era avvenuta nelle prime stelle a partire dall'idrogeno e dall'elio, e che ciò non era in contrasto con la teoria del Big Bang, che prevede, appunto, solo la formazione di elementi leggeri durante l'espansione iniziale.
Qualche anno dopo, nel 1964, la scoperta della radiazione di fondo cosmica (CMBR, dall'inglese Cosmic Microwave Background Radiation) ad opera di Arno Penzias e Robert Wilson, ricercatori dei Bell Laboratories, fornì la prova cruciale a favore del modello del Big Bang.

LA RADIAZIONE FOSSILE

La radiazione cosmica di fondo è infatti un'emissione radio nel campo delle microonde proveniente da tutte le direzioni con uno spettro corrispondente a quello di un corpo nero alla temperatura di 2,7 kelvin, che è appunto l'attuale temperatura dell'Universo, raffreddatosi durante l'espansione. Secondo la teoria del Big Bang, questa radiazione venne prodotta dalle interazioni fra la radiazione e la materia quando l'Universo era molto più giovane e caldo; rappresenta quindi la radiazione fossile che permea tutto l'Universo. Quando esso divenne sufficientemente freddo da disaccoppiare la radiazione dalla materia (con una drastica riduzione delle reciproche interazioni; era del

LA RADIAZIONE COSMICA DI FONDO PERMEA TUTTO L'UNIVERSO FIN DALLE SUE ORIGINI

I fisici Arno Penzias (sopra) e Robert Wilson (sotto) nel 1978 ricevettero il Premio Nobel per la scoperta della radiazione cosmica di fondo



L'antenna per microonde dei Bell Laboratories a Holmdel, nel New Jersey con la quale Penzias e Wilson scoprirono la radiazione cosmica di fondo

Commons

DOPO IL BIG BANG, UNA FORTISSIMA ACCELERAZIONE, PORTÒ L'UNIVERSO A DILATARSI IN MODO ESPONENZIALE

disaccoppiamento: circa 380.000 anni dopo il Big Bang), la CMBR iniziò a viaggiare liberamente nello spazio. Grazie all'impiego di satelliti, l'ultimo dei quali l'europeo Planck, è stato possibile effettuare misure sempre più precise e dettagliate del fondo di radiazione cosmica, dimostrandone l'omogeneità, elevatissima ma non totale, proprio come previsto dal modello di Gamow.

I PRIMI TRE MINUTI

Ma che cos'è successo dunque nei primi tre minuti di vita dell'Universo? Al momento non siamo assolutamente in grado di stabilire se esso abbia davvero avuto inizio dal Big Bang, e se quindi in quel momento abbia anche avuto inizio il tempo come noi lo conosciamo, o se, invece, l'Universo esistesse già prima del Big Bang, con il "grande botto" a fare semplicemente da momento di transizione fra un prima e un dopo.
Non esiste, infatti, una teoria capace di dirci cosa sia successo nei primissimi istanti dopo il Big Bang: le leggi fisiche che conosciamo perdono la loro validità attorno a 10^{-43} secondi dopo l'inizio (tempo di Planck).
All'origine di questa difficoltà sta l'incompatibilità concettuale fra le due teorie da applicare contemporaneamente in quei primissimi istanti: la meccanica quantistica, che descrive i fenomeni del microcosmo, e la relatività generale,

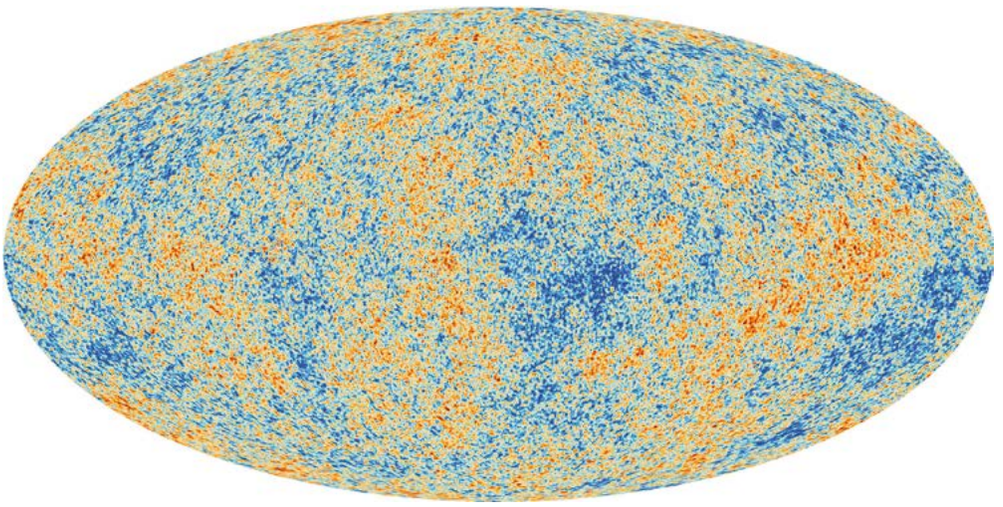
IL MODELLO COSMOLOGICO INFLAZIONARIO

A partire dagli anni Ottanta dello scorso secolo, grazie soprattutto agli studi dello statunitense Alan Guth e del russo Andrej Linde, volti a risolvere alcune gravi incongruenze fra il modello teorico del Big Bang e le osservazioni, si è fatta strada l'ipotesi che, una frazione infinitesima di secondo dopo il "grande botto", l'Universo sia andato incontro a una espansione esponenziale – denominata "inflazione". Il modello inflazionario è dunque una teoria cosmologica, che integra il modello standard del Big Bang caldo, secondo cui l'Universo, pochi istanti dopo la sua nascita, ha attraversato un intervallo brevissimo di tempo durante il quale ha subito un'improvvisa espansione di tipo esponenziale, al termine della quale – tutto entro il primo secondo di vita dell'Universo – ha proseguito la sua espansione al normale tasso previsto dal modello del Big Bang.
L'inflazione è causata dal campo gravitazionale repulsivo generato dal "falso vuoto": tale campo ha la particolarità di avere valore diverso da zero nel vuoto, ragione per cui il vuoto ha intrinsecamente immagazzinata una certa densità di energia (da cui deriva il nome di "falso vuoto"). Il processo inflattivo termina al momento in cui il campo di energia associato al falso vuoto decade, ovvero raggiunge il suo livello minimo di energia. L'ipotetica particella associata a questo campo di energia responsabile dell'inflazione è denominata inflatone. Alla fine del periodo inflattivo, l'interazione nucleare forte è distinta da quella elettrodebole a causa di un fenomeno che i fisici chiamano rottura spontanea di simmetria.
Per capire questo concetto, usiamo un'analogia macroscopica. Consideriamo per esempio una matita cilindrica ben appuntita. Come cilindro, gode chiaramente di una simmetria di rotazione attorno al proprio asse verticale: questo significa che da qualunque parte la si guardi o comunque la si ruoti, la matita resta uguale a se stessa (occorre però che sul fianco del cilindro non sia incisa la marca, altrimenti questa simmetria si perde!).
Ora, tenendo perfettamente verticale la matita, proviamo a spingere con sempre maggiore forza verso il basso. Inizialmente vedremo la punta iniziare ad appiattirsi, poi, quando la pressione supererà un certo valore critico (che dipende dalle caratteristiche fisiche del sistema, per esempio dalla durezza della mina), la punta si spezzerà, piegandosi verso una delle infinite possibili direzioni.
Nessuno è in grado di prevedere quale sarà la direzione scelta, quello che è certo è che, in questa nuova configurazione, il sistema ha perso la sua simmetria rotazionale rispetto all'asse verticale: si è quindi verificata una rottura spontanea della simmetria. In natura si osservano molte rotture spontanee di simmetria, ma a produrle è sempre l'alterazione di uno stato simmetrico causata dalla variazione di un parametro esterno al sistema (la pressione sulla matita, nell'esempio). Ma ritorniamo all'inflazione. Il modello inflazionario risolve in un colpo solo sia il problema dell'orizzonte che il problema della piattezza dell'Universo. Il primo problema si può formulare con questa domanda:

Il fisico satunitense Alan Guth

come può l'Universo essere tutto alla stessa temperatura, come dimostrano le osservazioni della radiazione cosmica di fondo? Nel modello cosmologico standard, infatti, a causa dell'avvio immediato dell'espansione subito dopo il Big Bang, zone distanti non dovrebbero essere mai state in

Betsy Devine, Commons



La radiazione cosmica di fondo in un'immagine raccolta nel corso della missione Planck, operativa dal maggio 2009 all'ottobre 2013. Osservare la CMBR, dall'inglese Cosmic Microwave Background Radiation, è come vedere la luce più antica del nostro Universo, quando aveva "appena" 380.000 anni

che invece descrive la geometria dello spazio-tempo su scale cosmiche. Il problema è che l'Universo primordiale era allo stesso tempo "grande" e "piccolo". Era grande perché la sua densità era talmente alta da far intervenire gli effetti della gravità e della curvatura dello spazio-tempo. Di conseguenza, per descriverne le proprietà occorre necessariamente applicare la relatività generale. Ma l'Universo neonato era anche piccolo, nel senso che racchiudeva, in dimensioni molto minori di quelle di un protone, tutta la materia e l'energia che oggi sono invece distribuite in tutto l'Universo. In conseguenza, per capire che cosa accadde quando esso

contatto fra loro. Ma nel modello inflazionario, l'espansione non inizia subito, così che, nei primissimi istanti prima dell'inflazione, l'Universo resta sufficientemente piccolo da permettere alle varie proprietà fisiche (temperatura, densità ecc.) di avere il tempo di livellarsi. È poi l'inflazione immediatamente successiva a "congelare" queste caratteristiche per tutto l'Universo.

Il secondo problema, quello della piattezza, si pone con questa domanda: perché, di tutte le possibili infinite curvature, lo spazio è sostanzialmente piatto, trovandosi quindi in una situazione geometrica molto particolare?

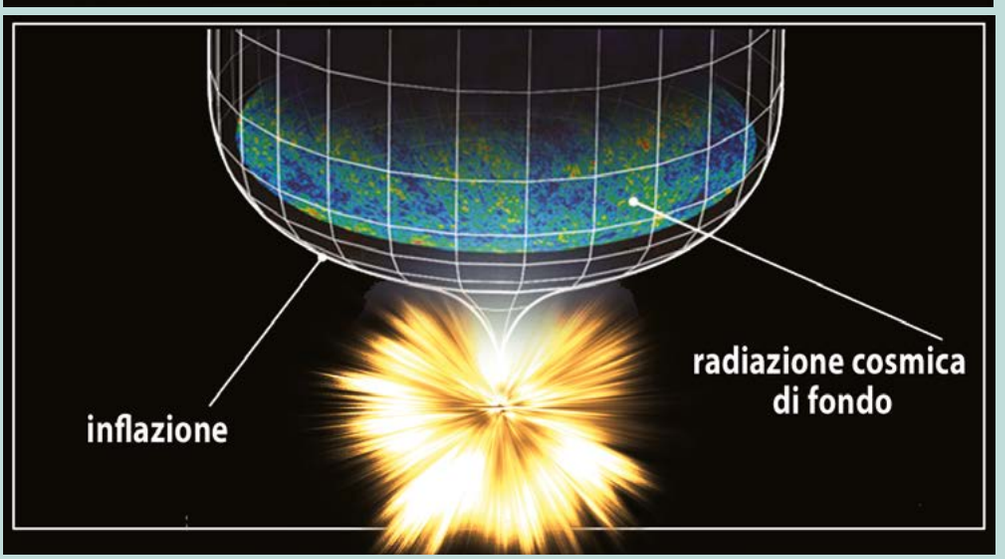
Noi viviamo su una superficie sferica (quella della Terra), ma questa è talmente grande rispetto alle nostre dimensioni che a noi sembra piatta. Solo guardando l'orizzonte sul mare o andando nello spazio ci si accorge di questa curvatura.

Se la Terra avesse le dimensioni di Giove, o del Sole, per esempio, vivendo sulla sua superficie sarebbe ancora più difficile accorgersi della sua curvatura (l'orizzonte sul mare sarebbe praticamente una linea retta).

Ecco, aiutandoci ancora con un'analogia, seppure poco rigorosa, possiamo dire che il nostro Universo, a causa di questa espansione esponenziale, è diventato talmente grande che non abbiamo alcuna possibilità di scorgerne la curvatura.

Anzi, questa curvatura proprio non c'è: l'inflazione ha reso piatto l'Universo. Con l'ipotesi dell'inflazione si spiegano anche lo "scoppio" iniziale e l'origine della materia stessa, nonché la nascita delle fluttuazioni di densità, che sono i semi della futura formazione delle galassie.

Il modello inflazionario è un'integrazione della teoria del Big Bang che prevede che, una frazione di secondo dopo la grande esplosione, l'Universo sia andato incontro a un'espansione esponenziale



ESA e Planck Collaboration, NASA / WMAP Science Team

LA MUSICA DELL'UNIVERSO

La nascita dell'Universo è stata accompagnata da una "sinfonia" di suoni oltre che dall'incredibile fuoco d'artificio del Big Bang.
L'importante scoperta è stata fatta analizzando la radiazione cosmica di fondo a microonde. Tale radiazione rappresenta la testimonianza fossile della grande esplosione da cui ebbe origine il nostro Universo circa 14 miliardi di anni fa.
Le piccolissime variazioni di temperatura (dette anisotropie) osservate sul fondo cosmico - che rappresentano i "semi" da cui avranno origine gli ammassi di galassie e in seguito le galassie - e le loro diverse dimensioni angolari (ovvero le loro dimensioni apparenti espresse mediante l'angolo sotto cui le vediamo: ad esempio, la dimensione apparente del Sole è circa mezzo grado) dimostrano che il plasma primordiale era attraversato da onde acustiche, cioè da onde sonore di diversa intensità e timbro che percorrevano l'Universo mentre questo era in fase di espansione.
Questa osservazione è in ottimo accordo con la teoria del "Big Bang inflazionario", della quale abbiamo parlato nelle pagine precedenti. Dalla "sinfonia" che accompagnò la nascita dell'Universo, in particolare dal timbro delle onde sonore che permeavano il plasma primordiale, è possibile capire il rapporto fra materia ordinaria e "materia oscura" (esotica). In pratica, a seconda della "composizione" in materia, l'incredibile ed enorme strumento musicale che doveva essere l'Universo poco dopo il Big Bang avrebbe dovuto suonare in maniera diversa. Passando magari dal suono di un violino a quello di un contrabbasso. Peccato che non sia più possibile udire quel suono. Erano i primi vagiti di un cosmo appena nato.

UNA CURIOSITÀ

Il musicista Arthur Jeffes, della Penguin Cafe Orchestra, con lo studio Marshmallow Laser Feast e in collaborazione con gli astrofisici Samaya Nissanke e Jean Michele Desert (del team di scienziati che ha idividuato le onde gravitazionali), ha condotto un'interessante sperimentazione rivolta a individuare la sinfonia del cosmo primordiale. I suoni dell'Universo neonato sono stati tradotti in musica attraverso sofisticati algoritmi.
Al sito: http://www.epcmusic.com/space è possibile ascoltare le sperimentazioni composte e conoscere meglio il progetto.

L'illustrazione sintetizza la storia dell'Universo, con particolare riferimento alla radiazione cosmica di fondo a microonde (CMBR, dall'inglese Cosmic Microwave Background Radiation). Sono indicati i diversi processi dell'evoluzione del cosmo a grande scala. Dall'inflazione, la breve epoca di espansione accelerata dell'Universo, al rilascio della CMBR, la più antica luce del nostro Universo, avvenuto solo 380.000 anni dopo la sua nascita. Dall'era oscura, alla nascita delle prime stelle e galassie, che hanno iniziato a popolare l'Universo quando aveva poche centinaia di milioni di anni, fino ad arrivare al tempo presente. Le piccole fluttuazioni quantistiche generate al momento dell'inflazione sono all'origine delle strutture che conosciamo oggi: le stelle e le galassie dell'Universo attuale.

R. Hurt Caltech-JPL CMS/onde gravitazionali, ESA/storia dell'Universo

era di dimensioni estremamente ridotte, occorre applicare le leggi della meccanica quantistica. Il problema è che queste due teorie sono al momento inconciliabili, perché partono da principi e idee (sulla natura dello spazio, del tempo, della materia e dell'energia) profondamente diversi.
Nonostante questa difficoltà iniziale, dopo i primi miliardesimi di miliardesimo di miliardesimo di secondo di vita la nebbia si dirada, e possiamo ipotizzare che l'Universo abbia iniziato a seguire le leggi della fisica che conosciamo e a quel punto i cosmologi sono in grado di raccontarci che cosa accadde con estrema precisione. L'evento fondamentale è la separazione fra le quattro forze fondamentali della natura (nucleare forte, elettromagnetica, nucleare debole, gravitazionale, in ordine di intensità), che in origine dovevano essere un'unica forza. La prima forza a separarsi è stata la gravità, che sarà di lì a poco destinata a dominare l'Universo su grande scala. Fanno poi la loro comparsa l'interazione nucleare forte, che per esempio tiene insieme protoni e neutroni nei nuclei atomici, e l'interazione debole. Anch'essa, come quella forte, agisce su scale molto piccole, a livello dei nuclei atomici, e regola alcuni fenomeni alla base del funzionamento delle stelle e della radioattività naturale. Infine, compare l'interazione elettromagnetica, che regola le forze fra particelle cariche ferme e in movimento e descrive la propagazione della luce e di tutte le onde elettromagnetiche. Tutto ciò avviene entro il primo secondo di vita dell'Universo.

VIOLENTI URTI FRA PARTICELLE E ANTIPARTICELLE PRECEDONO LA FORMAZIONE DEI PRIMI NUCLEI DI ELEMENTI CHIMICI LEGGERI

LA NUCLEOSINTESI PRIMORDIALE

In seguito a questo evento, esso è passato per una fase brevissima ma rapidissima di espansione, chiamata inflazione, durante la quale l'Universo ha aumentato drammaticamente le proprie dimensioni, un po' come succede a un palloncino che viene gonfiato. E qui fa la sua comparsa la materia: dopo l'inflazione, infatti, lo spazio è teatro di continui urti fra particelle e antiparticelle e conseguenti annichilazioni delle due. Per avere la formazione di particelle stabili è stato necessario attendere che la temperatura si abbassasse: così, via via che l'espansione procedeva e la temperatura scendeva, i quark riuscirono a legarsi per formare protoni e neutroni. Poi, nel giro di alcuni minuti, si formarono i nuclei degli elementi chimici più leggeri (in particolare l'elio): prendeva così il via la nucleosintesi primordiale.
Saranno, infatti, questi elementi leggeri – essenzialmente idrogeno, deuterio (un isotopo dell'idrogeno il cui nucleo è costituito da un protone e un neutrone), elio-3, elio-4 (due isotopi dell'elio: il primo con due protoni e un neutrone, il secondo con due neutroni) e un po' di litio-7 (nucleo con tre protoni e quattro neutroni) – a costituire la materia prima con cui si formeranno, un miliardo di anni dopo, le prime stelle. ■

LA STORIA

Nel passato

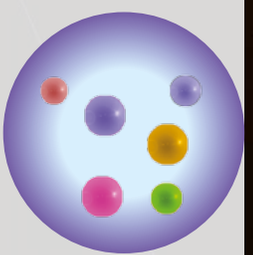
10^{-35} secondi dopo il Big Bang

INFLAZIONE

L'Universo appena nato dal Big Bang, densissimo e caldissimo, subisce un'espansione improvvisa, chiamata inflazione, che ne aumenta le dimensioni in maniera esponenziale.

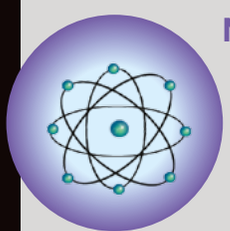
10^{-6} secondi dopo il Big Bang

PARTICELLE ELEMENTARI



Terminata l'inflazione, l'Universo continua a espandersi e a raffreddarsi, ma molto più lentamente. Lo spazio è invaso da quark, elettroni, fotoni e neutrini che si urtano reciprocamente.

3 secondi dopo il Big Bang

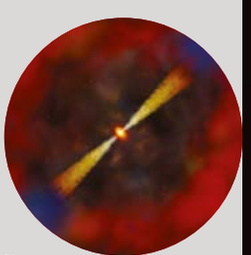


NUCLEOSINTESI PRIMORDIALE

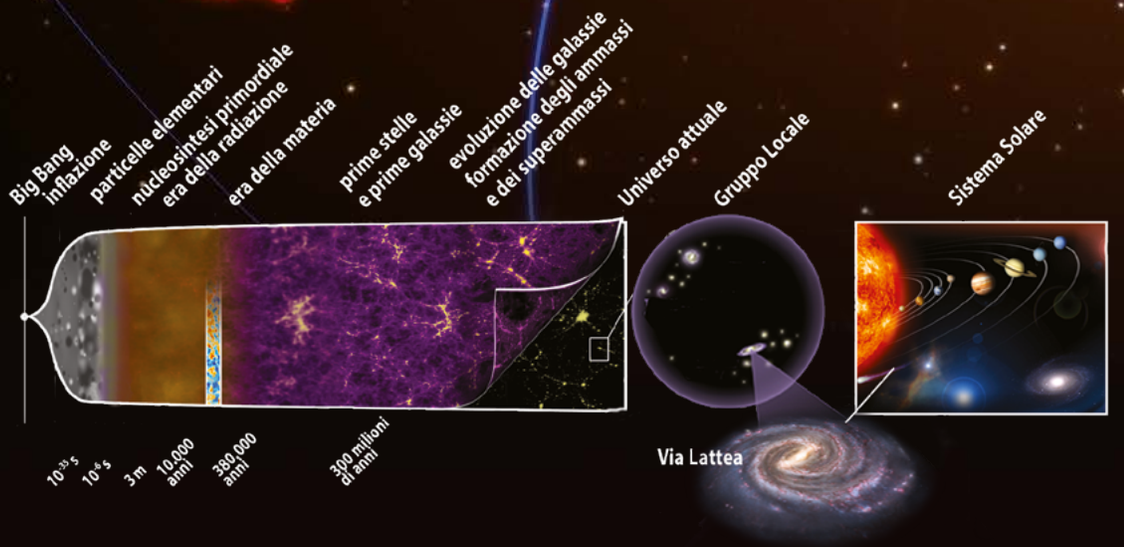
I protoni e i neutroni frutto degli urti fra particelle elementari iniziano a fondersi per dare origine ad alcuni elementi più pesanti: deuterio, elio e litio.

10.000 anni dopo il Big Bang

ERA DELLA RADIAZIONE



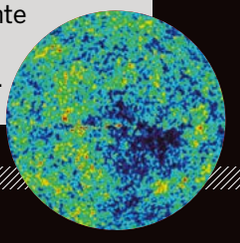
Per diverse migliaia di anni, la maggior parte dell'energia dell'Universo si trova sotto forma di radiazione elettromagnetica: raggi X, fotoni ultravioletti e così via.



380.000 anni dopo il Big Bang

ERA DELLA MATERIA

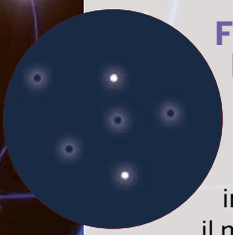
La temperatura è sufficientemente bassa perché gli elettroni si uniscano ai nuclei per formare atomi neutri. L'Universo diventa trasparente alla radiazione: nasce la radiazione cosmica di fondo.



DELL'UNIVERSO

Nel futuro

100.000 miliardi di anni dopo il Big Bang

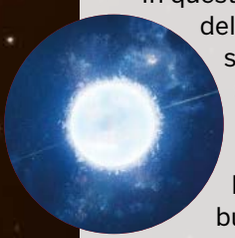


FINE DELL'ERA DELLE STELLE

Se, come ipotizzano i cosmologi, l'Universo si espanderà indefinitamente, arriverà il momento in cui non si formeranno più nuove stelle e le vecchie gradualmente si spegneranno.

10^{37} anni

FINE DELL'ERA DELLA DEGENERAZIONE



In questa epoca, la maggior parte della massa dell'Universo sarà concentrata in stelle degeneri, che rappresentano gli stadi finali di una stella: nana bianca, stella di neutroni, buco nero.

Da 10^{38} a 10^{100} anni

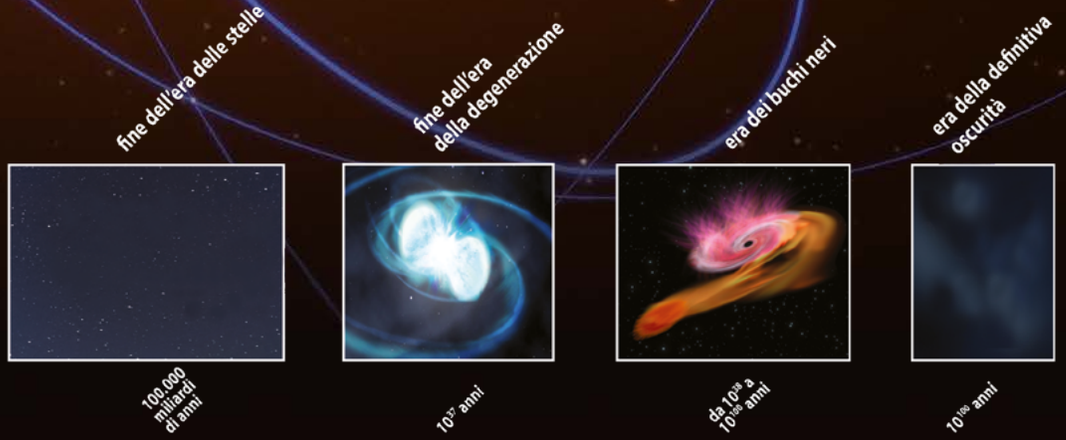
ERA DEI BUCHI NERI

In questo lunghissimo intervallo di tempo gli unici corpi celesti di tipo stellare saranno i buchi neri, che continueranno a fornire ancora un po' di energia all'Universo grazie alla loro "evaporazione".

10^{100} anni

L'ERA DELLA DEFINITIVA OSCURITÀ

Esaurita l'evaporazione dei buchi neri, restano le particelle più leggere e meno energetiche: elettroni, neutrini, fotoni di enorme lunghezza d'onda. L'universo è totalmente dissipato.

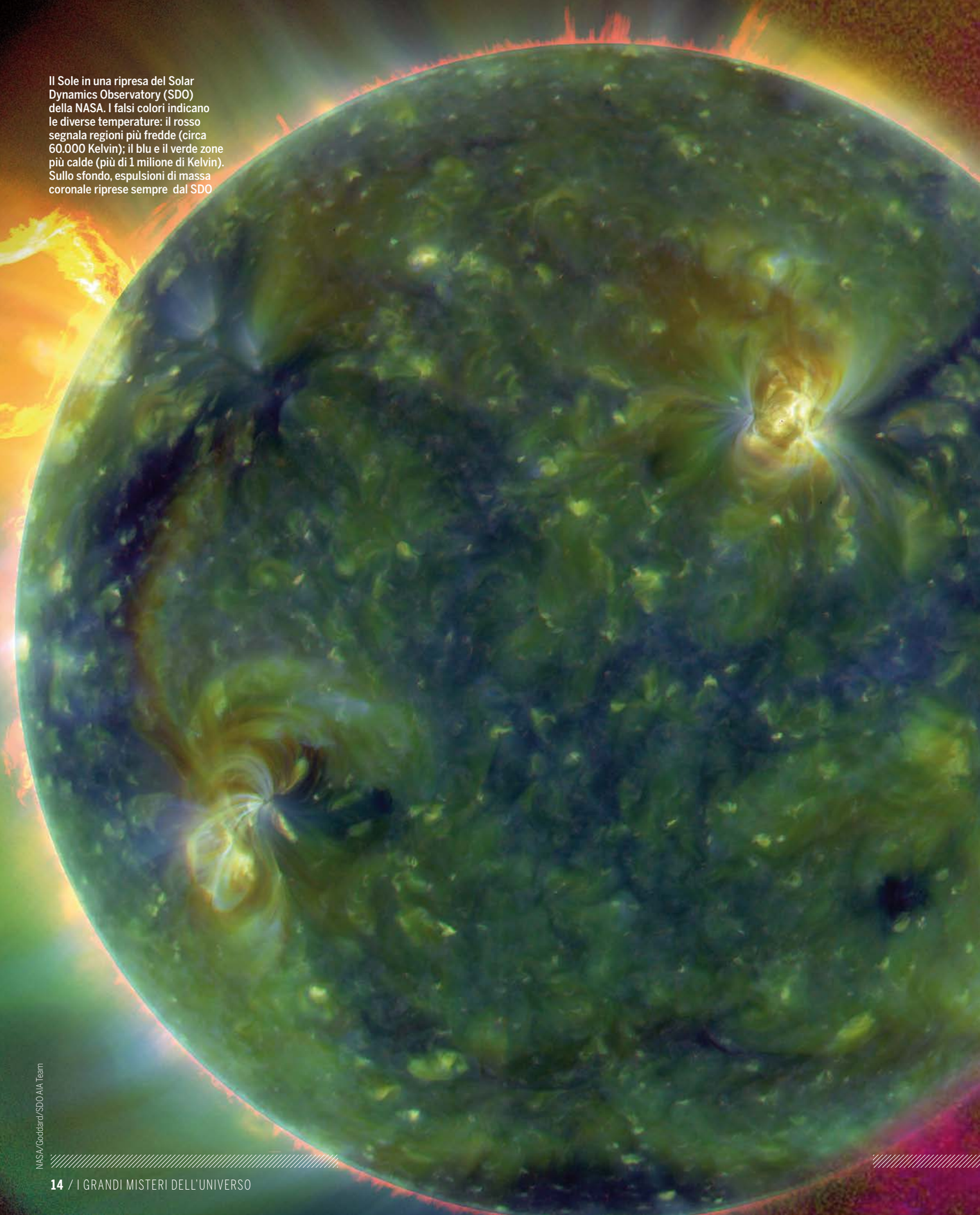


300 milioni di anni dopo il Big Bang

GALASSIE PRIMORDIALI

La gravità riesce finalmente a concentrare materia in alcune zone il cui il gas è più denso: è questo il momento in cui nascono le prime stelle e si formano le prime galassie.

ESO, NASA, ESA



Il Sole in una ripresa del Solar Dynamics Observatory (SDO) della NASA. I falsi colori indicano le diverse temperature: il rosso segnala regioni più fredde (circa 60.000 Kelvin); il blu e il verde zone più calde (più di 1 milione di Kelvin). Sullo sfondo, espulsioni di massa coronale riprese sempre dal SDO

NASA/Goddard/SDO AIA Team

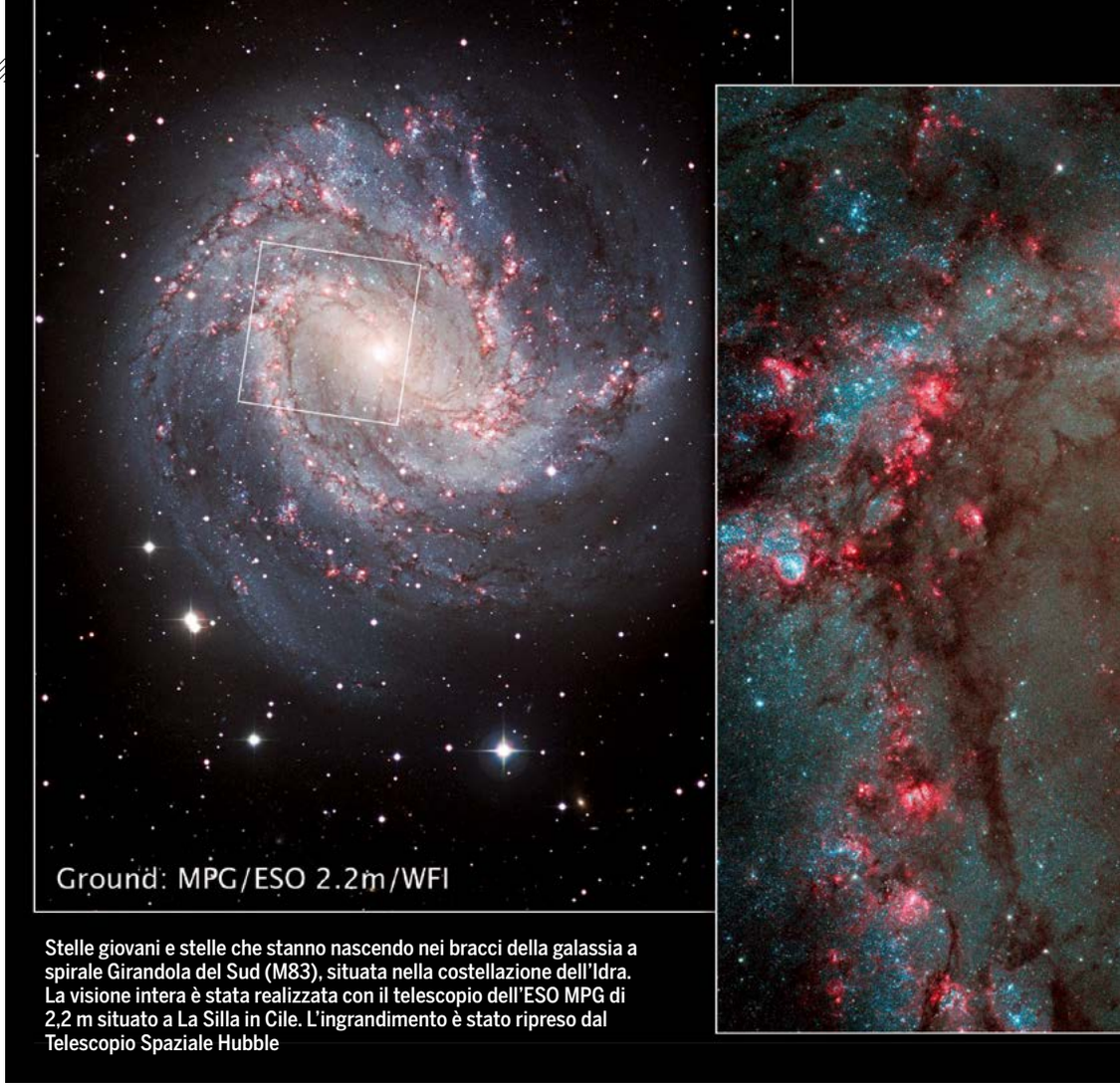
DALLE NEBULOSE ALLE STELLE

Hanno storie e destini diversi, differente è il loro aspetto e la loro dimensione. E il Sole, quella palla di fuoco così centrale nella vita del pianeta Terra, non è che una nana gialla come ce ne sono tante, fortunatamente molto longeva

Se ci troviamo in un luogo veramente buio, alzando gli occhi al cielo in una notte stellata, saremo colpiti dall'incredibile quantità di stelle che vedremo splendere sopra la nostra testa. La sensazione che la vista di un cielo stellato offre è veramente appagante, ed è forse per questo che l'uomo, sin dai primordi, si è dedicato allo studio degli astri e ai loro movimenti. Un cielo stellato è sempre uno spettacolo meraviglioso: migliaia di punti luminosi e scintillanti che occhieggiano da uno sfondo nerissimo, disposti secondo figure e geometrie che nel corso dei secoli hanno ispirato la fantasia di filosofi, poeti, naviganti e, naturalmente, astronomi. Ma che cosa sono veramente quei puntini luminosi che brillano nella notte?

NASA/Goddard Space Flight Center/SDO

Prima di tutto diciamo che le stelle non durano in eterno: anch'esse, come gli esseri viventi, nascono, vivono e muoiono. Alcune, come il Sole, vivono miliardi di anni, e arrivano alla morte, spegnendosi lentamente. Altre, invece, hanno vite molto più brevi e tormentate, ma soprattutto sono condannate a morire di morte violenta. Un'immane esplosione – brevissima rispetto alla vita della stella – pone infatti termine alla loro esistenza: la stella si è trasformata in supernova.
La luce di una supernova illumina il cosmo: lo scoppio è infatti visibile da miliardi di anni luce di distanza. Così, nel firmamento, spunta una stella dove prima apparentemente non c'era niente. Ecco il perché del nome: "nova" in latino significa infatti nuova. Per gli antichi era nata una nuova stella. In realtà la stella sta morendo, ma il nome è comunque rimasto. (Il suffisso "super" venne aggiunto dagli astronomi Walter Baade e Fritz Zwicky nel 1933.)
Il nostro Sole vivrà ancora a lungo e avrà una morte "dolce" e non esplosiva, diventando una nana bianca.
Andiamo dunque a vedere come è nato e che cosa accadrà prima della sua morte, descrivendo il lungo percorso che gli astrofisici definiscono "evoluzione stellare".



Stelle giovani e stelle che stanno nascendo nei bracci della galassia a spirale Girandola del Sud (M83), situata nella costellazione dell'Idra. La visione intera è stata realizzata con il telescopio dell'ESO MPG di 2,2 m situato a La Silla in Cile. L'ingrandimento è stato ripreso dal Telescopio Spaziale Hubble

DALLE NEBULOSE ALLE STELLE (E RITORNO)

A occhio nudo il cielo sembra popolato soltanto di stelle, più o meno brillanti, ma solo stelle. In realtà, fra una stella e l'altra l'apparente vuoto è spesso riempito, anche se con densità bassissime, dal cosiddetto mezzo interstellare, una miscela costituita da gas, in maggioranza idrogeno, e polveri. In alcune zone il mezzo interstellare è, però, più denso ed è proprio in queste regioni che le stelle nascono e, cominciando a splendere, illuminano in vari modi le nebulosità che le avvolgono e dalle quali hanno avuto origine. Quando il mezzo interstellare si manifesta, perché illuminato in vario modo dalle stelle circostanti, prende il nome di nebulosa diffusa. Molto spesso una nebulosa è associata a un gruppo più o meno cospicuo di stelle (ammasso galattico) immerso al suo interno, nell'enorme massa di idrogeno ed elio dalla quale queste hanno avuto origine: le stelle ricambiano la nube progenitrice riscaldandola e rendendola luminosa. La formazione stellare è un fenomeno tipico all'interno di queste enormi masse gassose. In pratica, dal tenue gas interstellare si condensano inizialmente protostelle. La contrazione, dovuta al collasso gravitazionale, contribuisce in questa fase a far aumentare la temperatura al centro della stella dai valori di 100 gradi, tipici del mezzo interstellare, fino ai valori necessari all'innesco delle reazioni termonucleari. Una protostella solitamente ha i massimi di emissione radiativa nelle lunghezze d'onda infrarosse, millimetriche e radio proprio a causa della sua bassa energia. È anche da notare che le protostelle non sono mai isolate, ma fanno sempre parte di un gruppo o di un ammasso: questo perché la nebulosità da cui esse hanno origine contiene materiale a sufficienza per formarne diverse.
Trascorsa questa fase, la stella passa nella cosiddetta "sequenza principale", dove attiva all'interno del nucleo la fusione termonucleare dell'idrogeno in elio. La fase che una stella trascorre sulla sequenza principale del diagramma H-R (dalle iniziali dei due ideatori, gli astronomi Ejnar Hertzsprung e Henry Norris Russell) è proprio la parte principale e di maggior durata della vita di quasi tutte le stelle; durante questa fase esse convertono idrogeno

MOLTE SONO LE REAZIONI RESPONSABILI DELLA PRODUZIONE DI ENERGIA NELLE VARIE FASI EVOLUTIVE DELLE STELLE

NASA, ESA, R. O'Connell, B. Whitmore (STSI), M. Dopita (Australian National Un.), e Wide Field Camera 3 Science Oversight Committee/M83

L'ammasso NGC 6496 ospita stelle ad alto contenuto di metallicità, una parte delle quali è variabile, cioè la loro luminosità fluttua nel tempo

in elio. Il resto della vita di una stella è relativamente breve rispetto al tempo che essa passa nella fase di sequenza principale, coprendo questo di solito circa l'ottanta per cento della durata complessiva della vita stessa dell'astro. D'altra parte, il tempo che una stella passa sulla sequenza principale dipende dalla quantità di combustibile nucleare di cui dispone e dal ritmo con cui lo consuma, cioè, in ultima analisi, dalla massa e dalla luminosità: naturalmente, le stelle di grande massa hanno una vita più breve proprio perché consumano il loro combustibile più velocemente.

La stella raggiunge qui le condizioni di massima stabilità. Quando il combustibile inizia però a scarseggiare, la produzione di energia ovviamente diminuisce, inducendo un'ulteriore contrazione del nucleo accompagnata da un'espansione del guscio esterno dovuta alla ripresa delle reazioni termonucleari.

Terminato l'idrogeno nel nucleo, infatti, alla stella non rimane altro che contrarsi di nuovo riscaldandosi ulteriormente. A questo punto accade che un guscio esterno al nucleo, ma abbastanza interno da raggiungere temperature dell'ordine di 10 milioni di gradi, riattiva la combustione dell'idrogeno e l'espansione dei gusci a lui esterni, mentre il nucleo, costituito da elio, continua a contrarsi. Questa fase di instabilità viene superata quando il nucleo, raggiungendo temperature di 100 milioni di gradi, attiva la combustione dell'elio. Le sorgenti di energia sono a questo punto due: il nucleo che brucia elio e un guscio più esterno che brucia idrogeno. La stella aumenta il suo raggio e la sua luminosità, diventando però più fredda: è ora una gigante rossa.

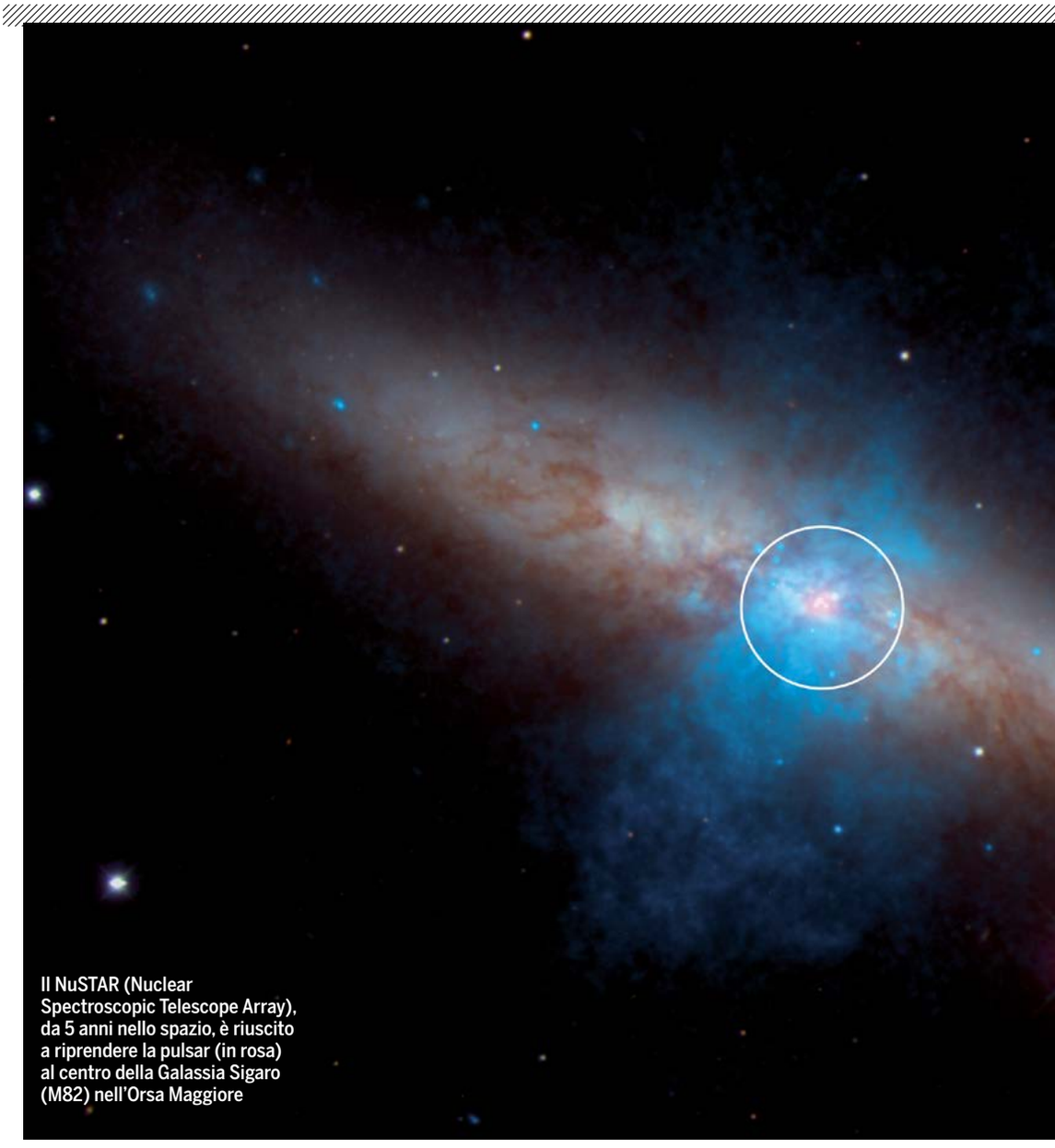
L'ulteriore evoluzione di una stella può passare attraverso altre combustioni nucleari, a seconda della sua massa, fino ad arrivare alla fase di supergigante rossa. La durata di vita di una stella

La Nebulosa Trifida ripresa dal Telescopio Spaziale Spitzer. Le frecce indicano le numerose protostelle che si stanno formando

ESA/NGC 6496, NASA/JPL-Caltech/J. Trifida

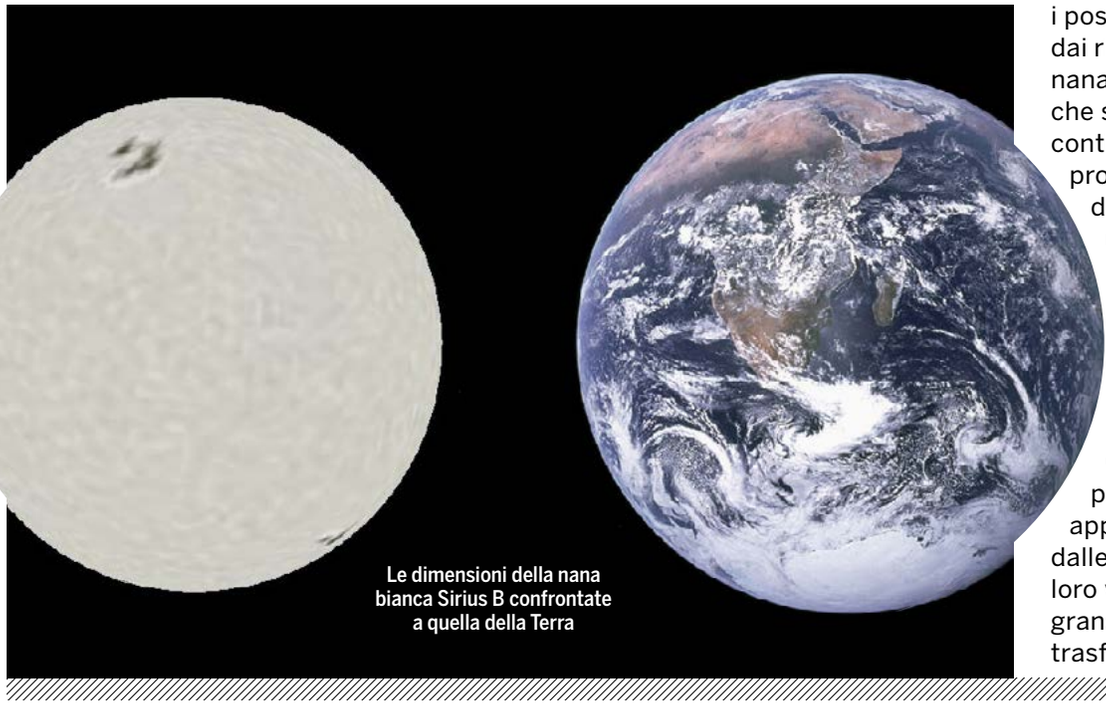
in queste fasi evolutive successive è comunque breve rispetto al tempo trascorso in sequenza principale. Occorre comunque tenere presente che se si è in presenza di masse stellari troppo piccole o troppo grandi (la massa e la composizione chimica sono gli unici due parametri che determinano univocamente l'evoluzione di una stella isolata), può darsi che, per opposte ragioni, tutto questo non avvenga: nel primo caso la temperatura troppo bassa non innesca la fusione dell'idrogeno e la stella diventa una nana bruna, mentre nel secondo caso la pressione di radiazione è così alta che lacera la stella.

Giungiamo infine alle fasi terminali dell'evoluzione stellare, ovvero alla morte dell'astro. La maggior parte delle stelle termina la propria esistenza sotto forma di nane bianche, cioè esse semplicemente si contraggono, terminata la combustione dei vari elementi, irraggiando nello spazio la loro energia termica. Una nana bianca tipica ha un raggio di circa 5000 chilometri, una densità media di circa un miliardo di chilogrammi al metro cubo (ovvero una tonnellata per centimetro cubo, un milione di volte più densa del Sole) e una temperatura alla superficie di 10.000 gradi. A densità così elevate il materiale stellare è nelle condizioni di gas degenere (ciò significa che gli elettroni presenti occupano tutti i possibili livelli energetici determinati dai rispettivi numeri quantici). Una nana bianca non può avere una massa che superi un certo limite, altrimenti continuerebbe indefinitamente la propria contrazione per insufficienza di forze oppositive, dando origine a una stella di neutroni, o, per masse ancora maggiori, a un buco nero. Tale limite critico di massa vale circa 1,4 volte la massa del Sole (limite di Chandrasekhar, dal nome dell'astrofisico teorico indiano Subrahmanyan Chandrasekhar, che lo determinò per primo). Questo valore è apparentemente basso, ma sappiamo dalle osservazioni che durante la loro vita le stelle possono perdere grandi quantità di massa (oltre quella trasformata in energia), scendendo

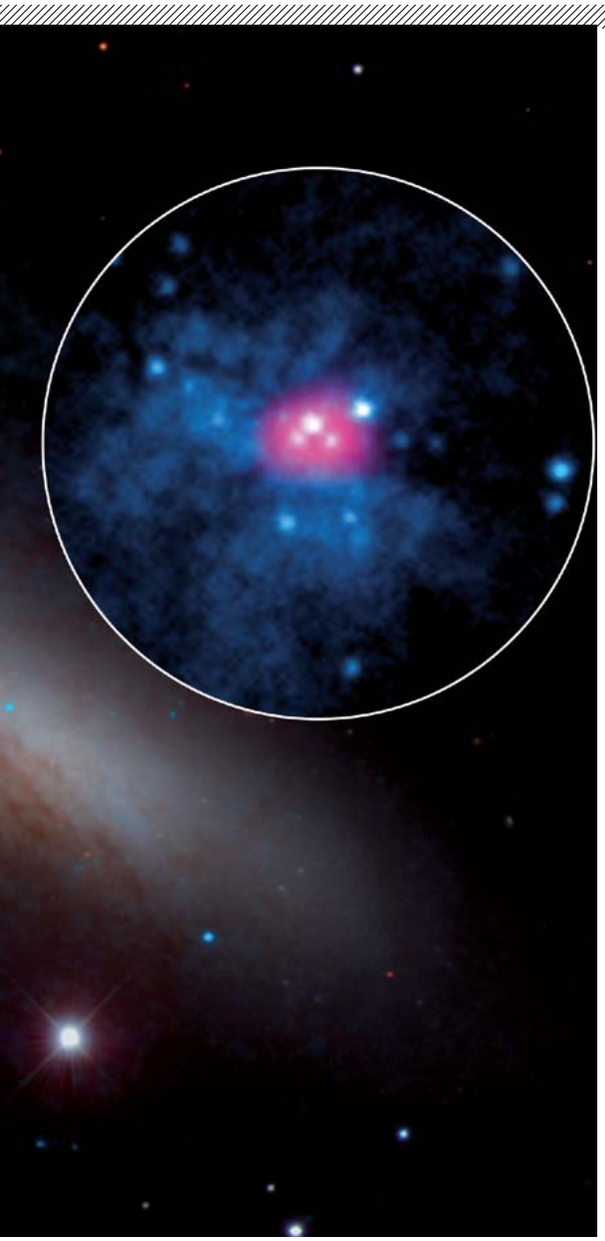


Il NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array), da 5 anni nello spazio, è riuscito a riprendere la pulsar (in rosa) al centro della Galassia Sigaro (M82) nell'Orsa Maggiore

NASA/JPL-CalTech M82. Omnidoom 999 Commons

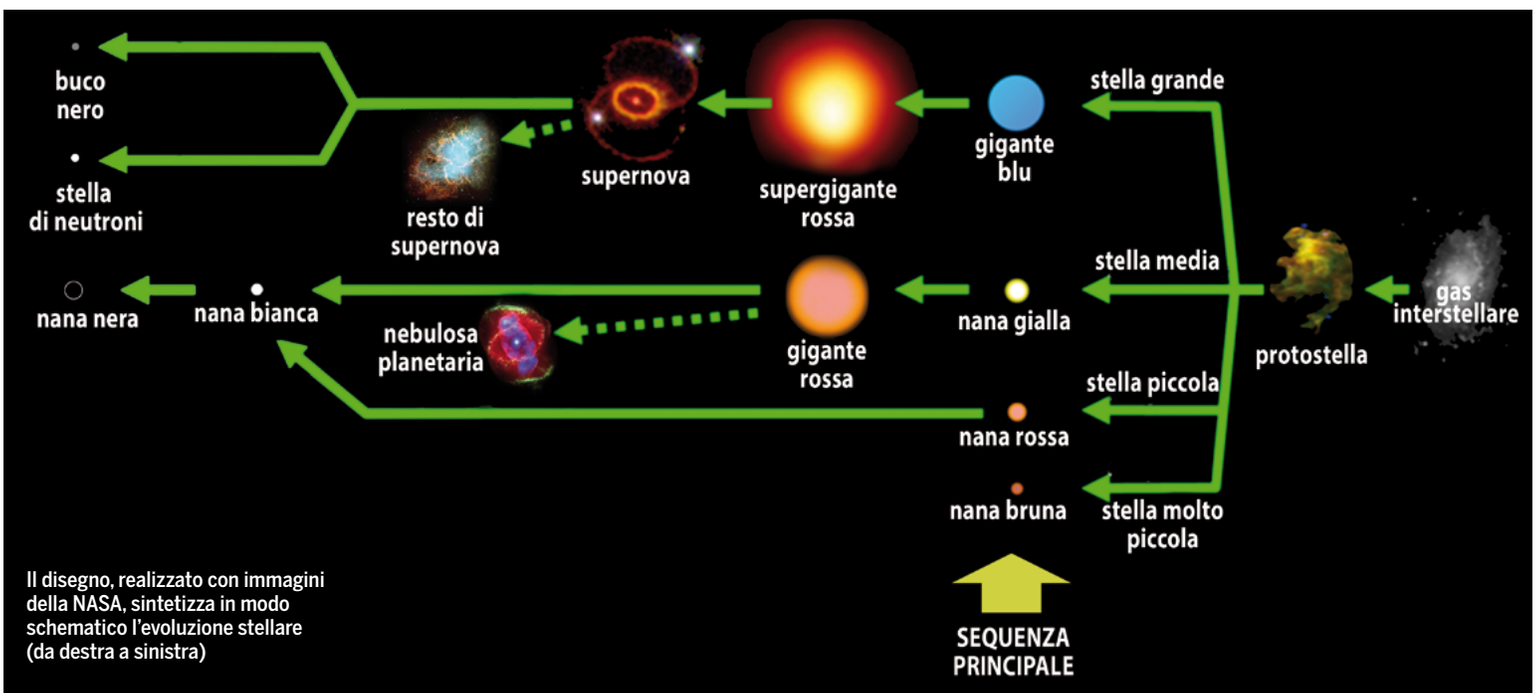


Le dimensioni della nana bianca Sirius B confrontate a quella della Terra



LE PROTOSTELLE SI FORMANO DAL RAREFATTO GAS INTERSTELLARE PER POI SEGUIRE FASI DIVERSE A SECONDA DELLA LORO MASSA

così sotto tale limite. Le giganti rosse perdono massa per opera dei cosiddetti venti stellari determinati dalla pressione di radiazione.
Talvolta, a causa di tali perdite, dovute a instabilità particolari, la stella si spoglia dei suoi strati più esterni, che vanno a formare una nebulosa planetaria, mentre essa diventa molto calda. Questa sarà la sorte che toccherà al nostro Sole.
Le stelle di massa maggiore (almeno otto volte più massicce del Sole), invece, muoiono in modo violento in esplosioni di supernova. Dopo molte fasi di combustione nucleare, in cui la stella arriva a sintetizzare il ferro, poiché le reazioni di fusione di questo elemento sono endotermiche, il nucleo diventa instabile e implode, mentre gli strati esterni della stella esplodono.
Si ha allora una gigantesca liberazione di energia: il guscio esterno, eiettato a grande velocità e con temperature elevatissime, costituisce il cosiddetto residuo o resto di supernova, mentre il nocciolo imploso può diventare appunto una stella di neutroni, dal raggio tipico di 10 chilometri e dalla densità media di circa 100 milioni di miliardi di chilogrammi al metro cubo, confrontabile con la densità di un nucleo atomico.
Per conservare il momento della quantità di moto (momento angolare), la stella aumenta notevolmente la sua velocità di rotazione e può essere osservabile, in determinate circostanze, sotto forma di pulsar (contrazione dell'espressione inglese *pulsating star*, stella pulsante) nelle frequenze delle onde radio.
Nel frattempo, la nebulosa che costituisce il resto di supernova si espande rapidamente, diffondendo nello spazio circostante gas ricchi non solo di idrogeno ed elio, ma anche di nuovi elementi da cui, eventualmente, potranno nascere nuove stelle.



Il disegno, realizzato con immagini della NASA, sintetizza in modo schematico l'evoluzione stellare (da destra a sinistra)

YuRi YuZi Commons disegno evoluzione stellare

I RESTI DI SUPERNOVE

Una supernova diffonde nello spazio gran parte del materiale che la costituiva. Il risultato dell'esplosione è una piccola stella di neutroni (o un buco nero, a seconda della massa della stella che esplode come supernova), circondata da una nube di materia che si espande allontanandosi dal nucleo dell'esplosione a velocità elevatissima: diverse migliaia di chilometri al secondo. Questa nebulosa, di forma irregolare, in continua e rapida evoluzione, prende il nome di resto di supernova (in sigla SNR, dall'inglese "Supernova Remnant"). La sua luminosità è in parte dovuta al fatto di essere "illuminata" dalla luce della stella che ancora si trova al centro, ma una parte della radiazione emessa dalla nube è dovuta anche a processi fisici che avvengono direttamente all'interno della nube stessa.

Immagine composita di N49, lo spettacolare resto di supernova più luminoso nella Grande Nube Magellano

NASA/CXC/Caltech/S.Kulkarni et al., STScI/UIUC/Y.H.Chu & R.Williams et al., R.Gehrz et al./N49, Commons

LE FONTI DELL'ENERGIA DELLE STELLE

Abbiamo dunque visto come nasce, vive e muore una stella. Adesso noi sappiamo che all'origine della luminosità delle stelle ci sono le reazioni nucleari prodotte all'interno dei loro nuclei caldi e densi, ma non è stato facile capire come le stelle facciano a brillare per così tanto tempo, addirittura per decine di miliardi di anni. Già 450 anni prima della nostra era, il filosofo greco Anassagora aveva tentato di fornire una soluzione al problema dell'origine e delle cause dell'energia emessa dalle stelle e dal Sole in particolare (egli pensava all'attrito generatosi tra le masse stellari in movimento e l'etere), ma soltanto nel 1853, grazie al fisico tedesco Hermann von Helmholtz, venne tentato un primo approccio scientificamente valido per risolvere la questione.
Helmoltz stabilì innanzitutto che il Sole si fosse formato per contrazione di una nebulosa primitiva sotto l'azione della gravità. La perdita di energia potenziale gravitazionale dovuta all'auto-collasso

A sinistra, Hermann von Helmholtz in un dipinto del pittore tedesco Ludwig Knaus. A destra, il filosofo presocratico Anassagora (496 -428 a.C. circa) in un'opera di Jose de Ribera realizzata nel 1636

FIGLI DELLE STELLE

Studiando la composizione delle rocce del nostro pianeta troviamo elementi leggeri come l'elio, il carbonio e l'ossigeno, ma anche elementi pesanti come il cobalto, l'oro, il piombo e l'uranio. I primi sono sintetizzati all'interno delle stelle durante le varie fasi evolutive. Ma l'unico meccanismo conosciuto per produrre gli elementi più pesanti del ferro, come sono quelli sopra citati, è la supernova. È infatti grazie all'enorme energia rilasciata nell'esplosione che, nella nube di gas eiettata nello spazio, si possono formare tutti gli elementi chimici. Ed è ancora grazie alle esplosioni di supernove che questi elementi vengono continuamente rimessi in circolo nello spazio. Per arrivare anche sulla Terra e dare origine alla vita come noi la conosciamo, che senza molti di questi elementi non potrebbe esistere.
Ecco perché siamo tutti figli delle stelle.

Hans Bethe (sopra) e, Carl Friedrich von Weiszäcker (sotto) studiarono i processi nucleari nelle stelle, con particolare riferimento alla produzione di energia

e la relativa conversione in calore avrebbe garantito la continuità della radiazione solare al tasso attuale per una cinquantina di milioni di anni. Ma la geologia prima e gli studi sulle datazioni radiometriche poi stabilirono che l'età del Sistema Solare è di circa quattro miliardi e mezzo di anni, rendendo questo meccanismo inadeguato.
Quali sono dunque le cause della radiazione solare e stellare in genere? La risposta poté essere data soltanto dopo la scoperta delle reazioni termonucleari, principali artefici della produzione di calore da parte delle stelle (oltre ovviamente la già ammessa contrazione, che fornisce il calore di innesco alle suddette reazioni).
Nel 1939, Carl Friedrich von Weiszäcker e Hans Bethe riuscirono a isolare infine le due reazioni responsabili della produzione di energia nella maggior parte delle stelle, la catena protone-protone (catena p-p) e il ciclo del carbonio; entrambi questi processi trasformano quattro protoni (nuclei di idrogeno) in un nucleo di elio, ma con procedimenti diversi. Ambedue i processi producono energia principalmente sotto la forma di radiazione gamma e neutrinica, mentre i due protoni del primo ciclo e il carbonio del secondo, risultanti dalla serie di reazioni, vengono utilizzati per l'innesco di successivi cicli.

NELLA NUBE DI GAS RILASCIATA DALLE ESPLOSIONI DI SUPERNOVAE SI FORMANO ELEMENTI CHIMICI PREZIOSI ANCHE PER LA VITA

I due cicli sopra descritti non sono gli unici, ma sono senz'altro i più importanti. Molte altre reazioni possono avvenire in varie fasi dell'evoluzione stellare, fino ad arrivare a sintetizzare elementi pesanti quali l'ossigeno, il neon, il magnesio, il silicio, o il ferro. Come accennato sopra, le reazioni di fusione oltre il ferro sono endotermiche, ossia assorbono energia; non sono quindi più utili alla produzione di calore. Tutti gli altri elementi oltre il ferro vengono infatti prodotti nel corso delle esplosioni di supernove.
È quindi chiaro che senza le fornaci stellari l'Universo non sarebbe altro che un deserto di idrogeno ed elio. E noi non potremmo essere qui a raccontarci questa storia. ■

NASA, ESA e Hubble Heritage Team STScI-AURA/SN E0102. Ian Howard. Commons. Los Alamos National Laboratory

I GIGANTI CHE ABITANO IL CIELO

Come si è evoluto l'Universo? Quali sono le strutture che lo compongono e come sono distribuite nello spazio? Ecco cosa ci raccontano gli scienziati alla luce dei risultati di recenti indagini condotte da Terra e con telescopi spaziali

ESO/H.H. Heyer

Una suggestiva rappresentazione della nostra galassia, la Via Lattea

I mattoni dell'Universo sono le galassie, enormi sistemi stellari tenuti assieme dalla forza di gravità. Le galassie, a loro volta, proprio come le stelle, hanno la tendenza ad aggregarsi, per costituire sistemi gravitazionalmente legati ancora più grandi e complessi, come gli ammassi di galassie e, a scala ancora maggiore, i superammassi di galassie.

Quando gli astronomi hanno iniziato a determinare con sempre maggiore precisione le distanze delle galassie e degli ammassi di galassie, hanno scoperto che questi non sono distribuiti in maniera omogenea nello spazio, conferendo così all'Universo – almeno fino a una certa scala di distanze – una struttura simile a una spugna, con enormi vuoti, ovvero zone in cui non si osservano galassie, ai bordi dei quali si

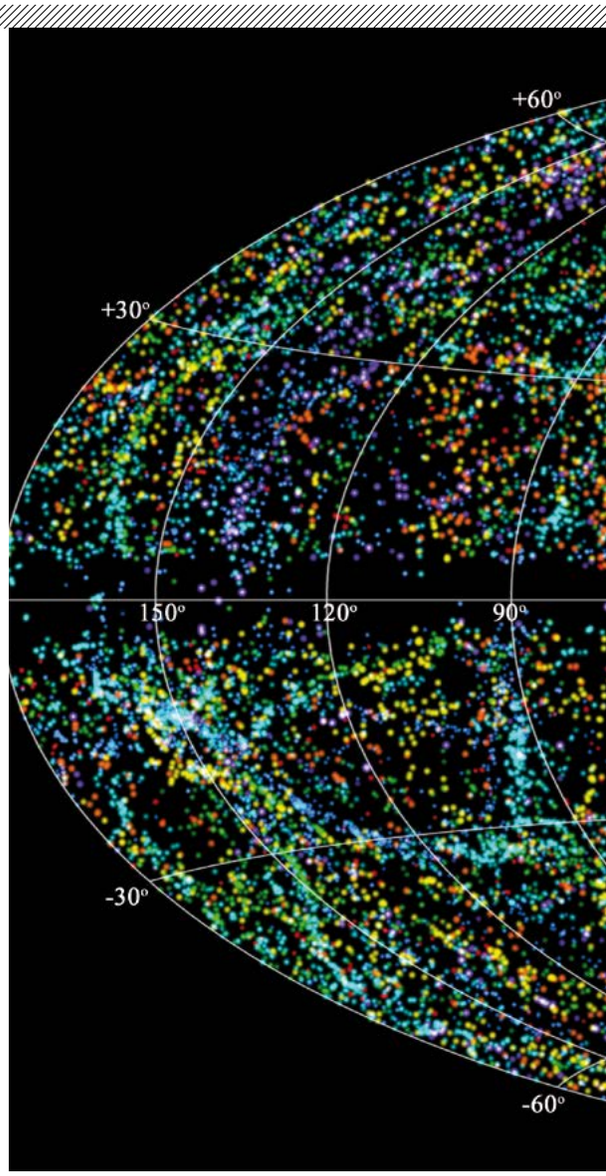
concentrano gli ammassi di galassie. In questo articolo vedremo dapprima come si misurano le distanze di questi "mattoni", per poi andare a scoprire la struttura a grande scala dell'Universo, ovvero come si distribuiscono le galassie al suo interno.

NON SOLO STELLE

Alzando gli occhi in una notte serena e buia, veniamo sopraffatti dall'incredibile numero di puntini luminosi che brillano sullo sfondo nero del cielo. Ma se i nostri occhi fossero in grado di vedere oltre, scoprirebbero che quello sfondo è solo apparentemente nero. In realtà, infatti, pullula non solo di stelle, ma anche, e soprattutto, di galassie.
Adesso sappiamo che l'Universo è pieno di galassie. Oltre cento miliardi è la stima degli astronomi, ma c'è anche chi sostiene che siano molte di più. La nostra è una delle tante, tipica, di taglia media, con nessun particolare caratteristica che la renda speciale (a parte il fatto che ospita noi, naturalmente). Ma come sono distribuite nello spazio tutte queste galassie? Lo occupano in maniera omogenea oppure sono disposte in maniera più complessa e articolata? Per scoprire quale sia la distribuzione a grande scala delle galassie è ovviamente necessario procedere con la catalogazione del maggior numero di

PIÙ DI CENTO MILIARDI DI GALASSIE POPOLANO IL CIELO E C'È CHI TEORIZZA SIANO MOLTE DI PIÙ

L'astronomo Friedrich Wilhelm Herschel (1738-1822) in un dipinto a olio realizzato da Lemuel Abbott e conservato alla National Portrait Gallery a Londra



La galassia di Andromeda è la struttura più grande del Gruppo Locale. Recenti studi hanno stimato che ospita mille miliardi (un billione) di stelle

Commons. Jacob Bers (Bersonic)/APOD NASA

La volta celeste ripresa attraverso i dati raccolti dalla "The Two Micron All Sky Survey" (2MASS) tra il 1997 e il 2001. Indagini come questa, consentono di catalogare le strutture che formano l'Universo

galassie possibile.
Gli iniziatori delle attività di scandagliamento sistematico del cielo a caccia di nebulose e galassie – all'epoca ancora non era nota la differenza – da catalogare sono stati l'astronomo inglese (ma tedesco di nascita) Friedrich Wilhelm Herschel e suo figlio John, autore del "General Catalogue of Nebulae and Clusters" (GC) pubblicato nel 1864 e contenente oltre 5000 oggetti nebulari, di cui più di 4600 erano stati scoperti da lui e da suo padre.
Se si pensa che ancora oggi si impiega il "New General Catalogue" (quello della famosa sigla NGC), revisione e integrazione del GC operata dall'astronomo danese John Louis Emil

John Herschel (1815-1879), in una fotografia realizzata da Julia Margaret Cameron

Dreyer nel 1888, si può immediatamente comprendere quanto sia stato prezioso il lavoro degli Herschel.
Fu proprio John Herschel, in fase di compilazione del catalogo, a scoprire che molte "nebulose" erano concentrate in una ristretta zona di cielo in direzione della costellazione della Vergine, annotando che un terzo di queste era contenuto in un ottavo di cielo. Ma non si fermò qui, perché arrivò addirittura a descrivere quello che poi, oltre un secolo dopo, venne riconosciuto come il Superammasso Locale, un sistema, secondo quanto appuntato da Herschel, approssimativamente sferico, al cui centro doveva trovarsi la condensazione di galassie della Vergine, mentre la nostra Galassia era relegata alla lontana periferia di questa, seppure collegata ad altri membri di questa stessa periferia (quello che adesso sappiamo essere il nostro Gruppo

Smithsonian Astrophysical Observatory, Commons

PRIMA E DOPO IL "GENERAL CATALOGUE"

Prima dell'intensa opera di catalogazione di William e John Herschel, l'unico catalogo di oggetti nebulari esistente era quello compilato dall'astronomo francese Charles Messier, pubblicato nella sua versione finale nel 1781 e comprendente 103 oggetti (anche se attualmente si riconosce a Messier e al suo collega e amico Pierre Mechain la scoperta di altri sette oggetti nebulari). Alcuni anni prima, nel 1763, Nicolas Louis de Lacaille aveva invece redatto un catalogo stellare del cielo australe comprendente 42 nebulose, portando in totale a 68 il numero di oggetti nebulari conosciuti sino ad allora. Dopo il lavoro degli Herschel, trascorse molto tempo prima di comprendere che quelle che i due astronomi inglesi avevano catalogato come "nebulose a spirale" erano, invece, oggetti extragalattici. La conferma arrivò solo quando si potè misurare la loro distanza e scoprire così che erano situate ben oltre i confini della nostra Galassia. A riuscirci, fra il 1923 e il 1924, grazie alle osservazioni condotte all'Hooker Telescope dell'Osservatorio di Monte Wilson (Contea di Los Angeles, in California), allora lo strumento più potente del mondo, fu Edwin Hubble. Gli ulteriori studi di questo astronomo statunitense sfociarono nella scoperta dell'espansione dell'Universo e della legge empirica – nota appunto come "legge di Hubble" – che lega la distanza di una galassia alla sua velocità di allontanamento da noi: lo strumento fondamentale per determinare la struttura a grande scala dell'Universo.

L'Hooker telescope di Monte Wilson utilizzato da Hubble

FU HUBBLE A SCOPRIRE CHE L'UNIVERSO SI DILATA, AUMENTANDO LE DIMENSIONI CON IL PASSARE DEL TEMPO

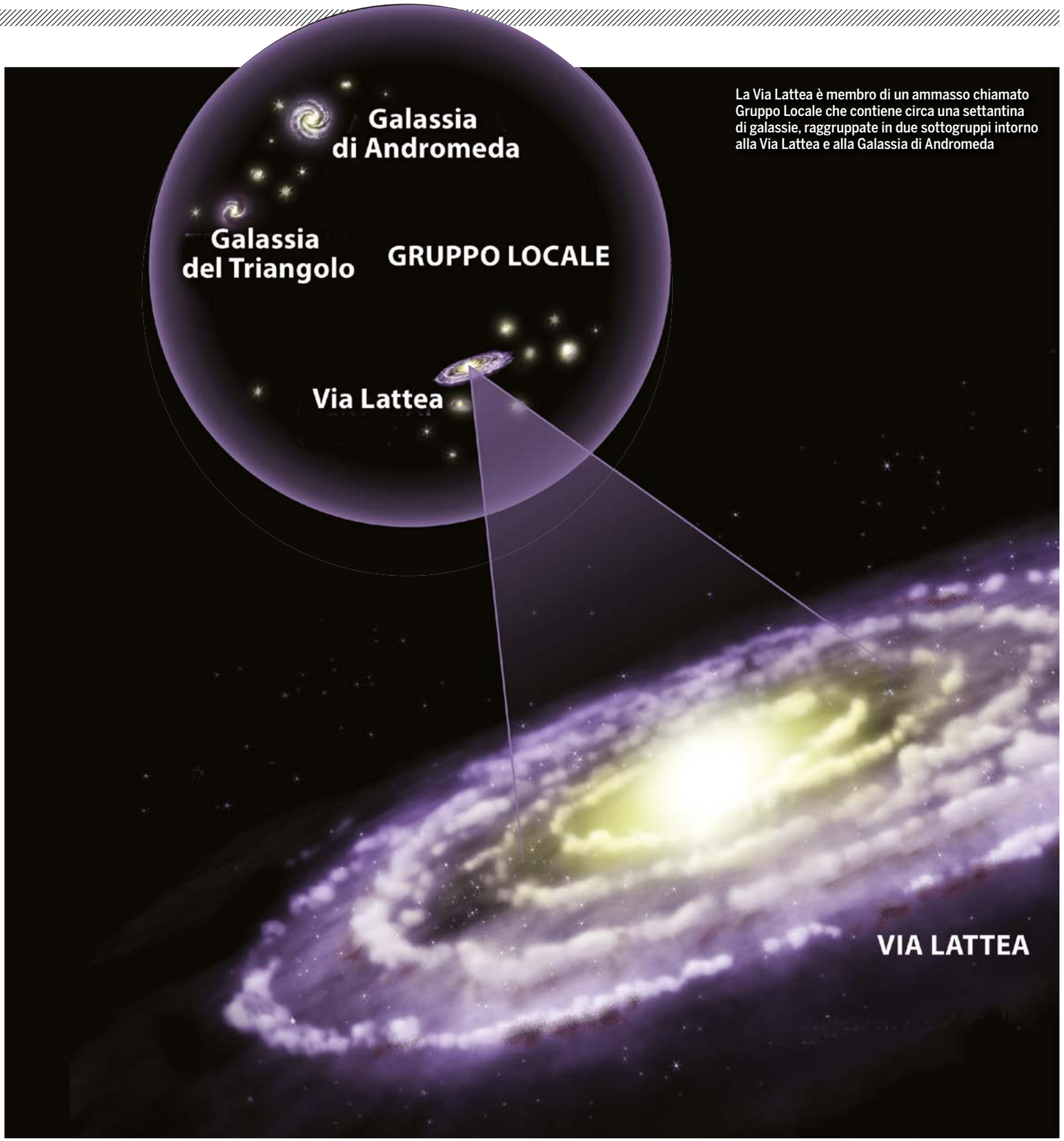
Locale di galassie). Peccato che John Herschel non conoscesse la natura extragalattica della maggior parte degli oggetti da lui catalogati e che per lui e per i suoi contemporanei fossero sempre e comunque "nebulose".

LA LEGGE DI HUBBLE

Era il 1929 quando l'astronomo statunitense Edwin Hubble dimostrò che l'Universo non era statico, come si era pensato fino a quel momento: il

L'astronomo francese Charles Messier (1730 – 1817) all'età di quarant'anni.

Commons



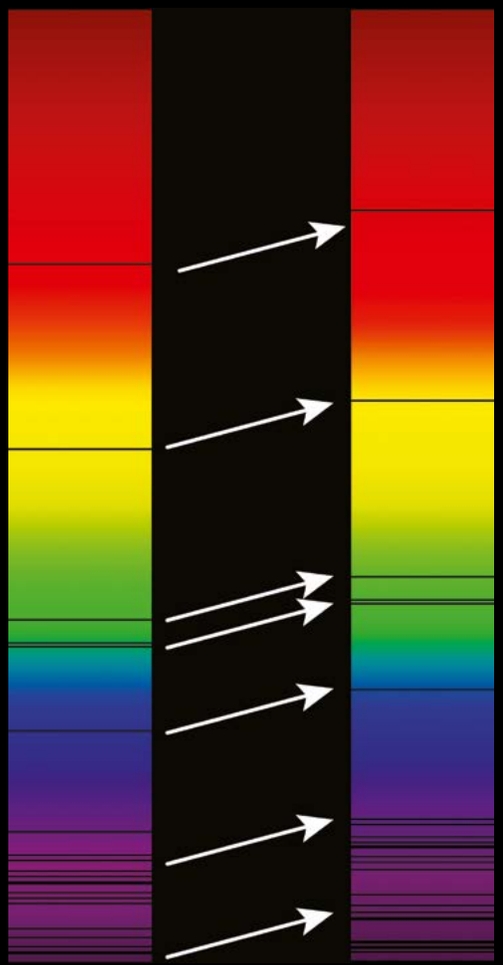
La Via Lattea è membro di un ammasso chiamato Gruppo Locale che contiene circa una settantina di galassie, raggruppate in due sottogruppi intorno alla Via Lattea e alla Galassia di Andromeda

suo moto di espansione era dimostrato dal fatto che le galassie stavano tutte allontanandosi le une dalle altre, come se, andando indietro nel tempo, ci fosse stata un'immane esplosione (Big Bang) ad aver scagliato la materia in ogni direzione. L'Universo si sta dilatando, aumentando le proprie dimensioni al trascorrere del tempo. Ma qual è la misura di questa espansione? Quanto velocemente si allarga lo spazio che separa la nostra Galassia da una galassia lontana? A rispondere a questa domanda fu lo stesso Hubble che, nel 1931, pubblicò assieme a Milton Humason lo storico articolo in cui dimostrava l'esistenza di una semplice relazione fra la distanza delle galassie e la loro velocità di allontanamento. Fattore di proporzionalità fra le due grandezze è la "costante di Hubble", che rappresenta la misura del tasso di espansione. In pratica, maggiore è la distanza di una galassia, più alta è la sua velocità di recessione (la velocità con la quale le galassie sembrano allontanarsi l'una dall'altra). Era stato così individuato un modo

NASA, Chandra X-ray Center CXC, M. Weiss

L'EFFETTO DOPPLER

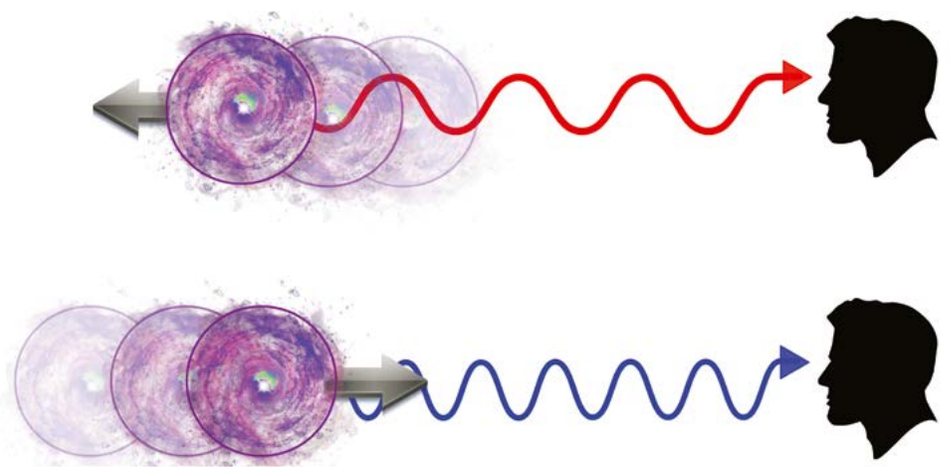
Quando una sorgente di onde (sonore, luminose ecc.) e un osservatore sono in movimento l'uno rispetto all'altra, si produce una modificazione delle lunghezze d'onda percepita: tanto più si allontanano, tanto maggiori sono le lunghezze d'onda che vengono emesse.
È questo l'effetto Doppler, dal nome del fisico austriaco Christian Andreas Doppler che per primo lo scoprì, nel 1845, applicato alle onde sonore. Il fisico francese Hippolyte Fizeau scoprì indipendentemente lo stesso effetto nelle onde elettromagnetiche nel 1848 (tanto che, in Francia, l'effetto è a volte chiamato "effetto Doppler-Fizeau").
Un esempio dell'effetto Doppler per le onde sonore è quello tipico dalla sirena di un'autoambulanza che ci raggiunge e ci supera: mentre si avvicina, infatti, percepiamo il suono della sirena più acuto (quindi con una lunghezza d'onda minore); dopo averci superato, invece, e via via che questa si allontana, il suono della sirena cambia frequenza e lo percepiamo sempre più basso (ovvero con lunghezze d'onda maggiori).
Analogamente, i colori di un oggetto che si avvicina molto velocemente a noi ci appaiono spostati verso lunghezze d'onda minori, cioè verso il blu (da cui l'espressione blue shift), mentre quelli di un oggetto in allontanamento li vedremo spostati verso il rosso (red shift).



Linee di assorbimento nello spettro ottico di un superammasso di galassie (BAS11) (a destra) rispetto a quelle dello spettro ottico del Sole (a sinistra). Le frecce indicano lo spostamento verso il rosso (red-shift)

questi ultimi rispetto ai primi: da qui i cosmologi deducono una condizione di moto relativo delle galassie rispetto a noi. In particolare, se la galassia è in avvicinamento le sue righe sono spostate verso il blu, mentre se si sta allontanando osserviamo righe spostate verso il rosso. In realtà non sono le galassie a muoversi, ma è lo spazio che le separa a dilatarsi: è proprio questa espansione a produrre sulla luce proveniente da questi oggetti lontani l'effetto di "stiramento", ovvero di allungamento, delle lunghezze d'onda.
Come accennato poco sopra, nella legge di Hubble, la costante di Hubble H_0 rappresenta il tasso dell'espansione cosmica. Così, maggiore è H_0, più velocemente procede l'espansione, laddove, viceversa, a un basso valore di H_0 corrisponderebbe un processo espansivo più lento. In realtà, sappiamo dalle attuali teorie cosmologiche che il tasso di espansione non è mai stato costante nel tempo, essendo da un lato le velocità di recessione delle galassie sicuramente rallentate dalla reciproca attrazione gravitazionale, ma essendo anche (quasi) certa l'esistenza di un termine, noto come costante cosmologica, nelle equazioni che descrivono l'evoluzione dinamica dell'Universo, introdotto per spiegare il processo di espansione accelerata evidenziata dalle osservazioni.
Da questi ragionamenti si capisce che quella che gli astronomi, per comodità e motivi storici, chiamano costante è tutt'altro che tale. Ogni epoca dell'Universo ha un suo valore caratteristico della costante di Hubble.

semplice per calcolare le distanze, dato che le velocità possono essere determinate osservando lo spostamento verso il rosso delle righe negli spettri delle galassie (redshift cosmologico). Per spettro della radiazione si intende infatti la distribuzione delle onde elettromagnetiche in funzione della loro lunghezza d'onda che, per la luce visibile, consiste nella sua scomposizione nei vari colori (come accade appunto nell'arcobaleno, che è ovviamente lo spettro della luce proveniente dal Sole). Così, confrontando spettri di laboratorio – sorgenti di righe note e in quiete – con spettri di galassie in cui siano presenti righe dello stesso tipo, si nota la presenza di uno spostamento delle righe in



Il disegno sopra illustra lo spostamento verso il rosso (in inglese, redshift); quello sotto, lo spostamento verso il blu (blushift)

Georg Wiora Commons

LA DISTANZA DELLE GALASSIE È IN RELAZIONE ALLA LORO VELOCITÀ DI ALLONTANAMENTO

Da sinistra: Milton Humason, Edwin Hubble, Walter Baade e Rudolf Minkowski. Anche Baade e Minkowski si occuparono, fra altro, di studiare la distanza delle galassie come parametro di valutazione della struttura dell'Universo

LE "REDSHIFT SURVEY"

Una volta scoperta la legge che porta il suo nome, Hubble iniziò ad applicarla per determinare le distanze di quante più galassie possibile. Da quel momento, e ancora oggi, la legge di Hubble è in effetti lo strumento principale per il calcolo delle distanze cosmologiche, anche se, nel corso degli ultimi decenni, sono state ideate diverse altre tecniche, alcune delle quali molto complesse (una delle tecniche più efficaci è quella basata sulle osservazioni delle supernovae di tipo Ia).
Le "redshift survey", così vengono chiamate le indagini volte a misurare gli spostamenti verso il rosso delle righe spettrali di grandi campioni di galassie, in modo da poter determinare la distanza di ciascun componente del campione, vengono adesso condotte con grandi strumenti al suolo o con telescopi spaziali.
La prima "redshift survey" venne condotta fra il 1977 e il 1982 da un gruppo di astronomi guidati da John P. Hucra dell'Harvard Smithsonian Center for Astrophysics (CfA), con lo scopo di misurare le velocità radiali di tutte le galassie più brillanti della magnitudine apparente 14,5. Essendo limitata dalla magnitudine, questa prima indagine servì quindi a produrre una mappa delle nostre vicinanze. Le galassie studiate furono circa 2200. Una seconda "survey", nota con la sigla CfA2, seguì negli anni 1985-1995, condotta sempre da Hucra in collaborazione con Margaret J. Geller. Questa indagine, più profonda, portò i due astronomi a misurare le velocità radiali di circa quindicimila galassie dell'emisfero boreale con magnitudine apparente (la luminosità di un corpo celeste come appare da Terra) inferiore a 15,5 e velocità radiali inferiori a 15000 km/s, arrivando a scoprire per la prima volta alcune importanti strutture a grande scala, come la "Great Wall" ("Grande Muraglia", in analogia con quella cinese), una lunga e sottile striscia di galassie dalle incredibili dimensioni di circa 600x250x40 milioni di anni luce che attraversa praticamente metà cielo, posta a una distanza media da noi di circa 350 milioni di anni luce.
Già nelle prime mappe della CfA2 sono evidenti le forti disomogeneità che caratterizzano l'Universo locale – ovvero a meno di un miliardo di anni luce di distanza –, mostrando che la distribuzione delle galassie nello spazio è tutt'altro che casuale, ma che queste si dispongono tipicamente su "superfici", simili a bolle, che circondano zone praticamente prive di galassie: i cosiddetti "vuoti", di cui pare l'Universo sia pieno.
Alle "redshift survey" pionieristiche condotte dagli astronomi del CfA ne sono seguite molte altre, alcune volte a mappare con maggiore dettaglio l'Universo locale, pertanto studiando galassie a basso redshift, altre volte

Armagh Observatory

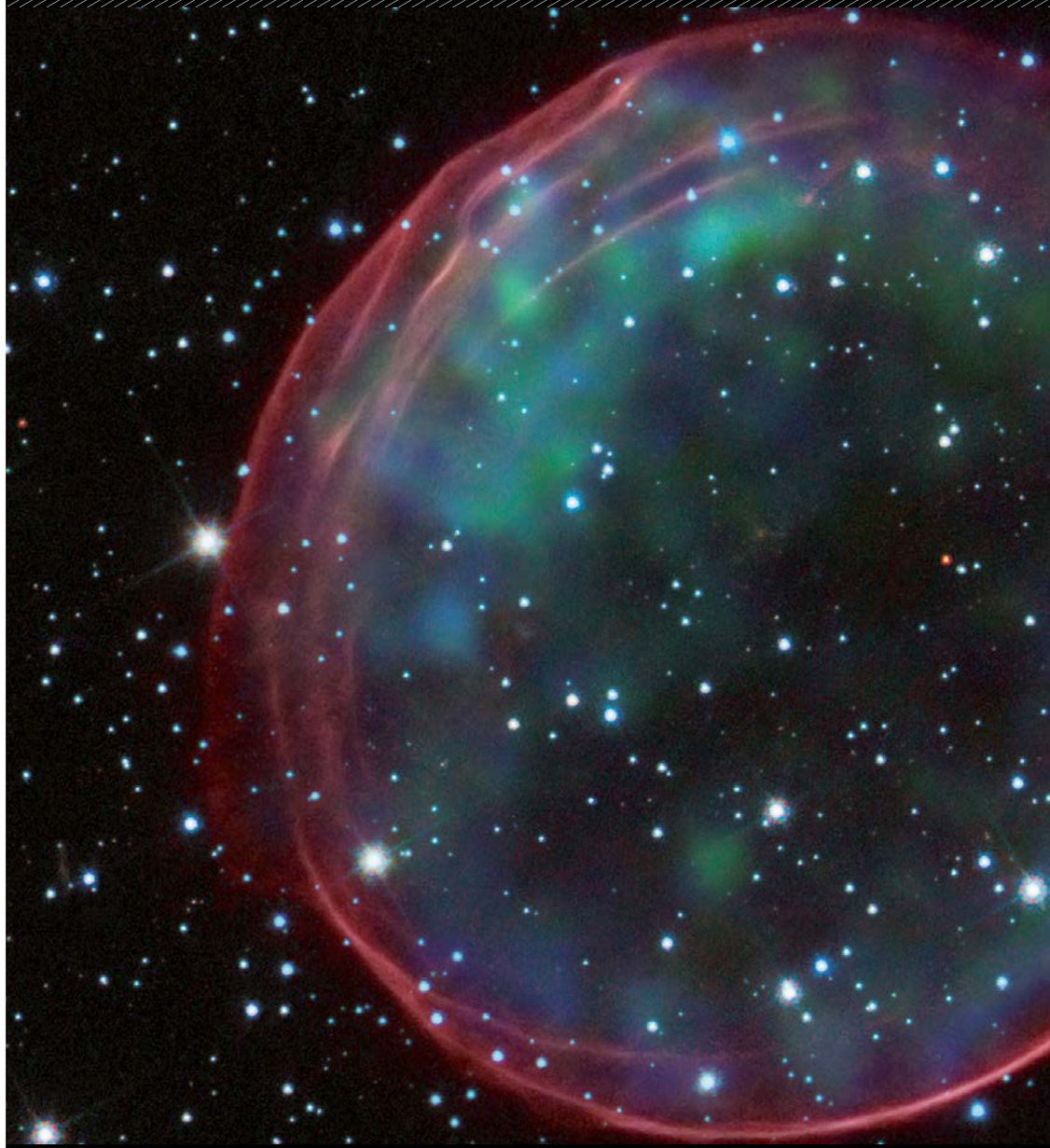
LE REDSHIFT SURVEY, CONSENTONO DI DETERMINARE LA DISTANZA DELLE GALASSIE DA NOI

a caratterizzare le strutture a scala ancora più grande, ovvero andando a osservare galassie ad alto redshift.

STRUTTURE A GRANDE SCALA

La prima struttura a grande scala che si incontra allontanandoci dal piccolo gruppo di galassie cui appartiene la nostra, il cosiddetto Gruppo Locale, è l'ammasso di galassie della Vergine, di cui il Gruppo Locale stesso costituisce un'appendice periferica. L'ammasso della Vergine si trova a sua volta in prossimità del centro di un superammasso, noto come Superammasso della Vergine o Superammasso Locale, avente un diametro di circa 200 milioni di anni luce e contenete circa 100 fra gruppi e ammassi di galassie.
Gli astronomi si sono però resi conto che queste strutture sono ben poca cosa se confrontate con altre nemmeno poi così lontane, scoperte grazie alle "redshift survey". Uno degli aspetti più interessanti da considerare nello studio della distribuzione delle galassie nell'Universo è che le galassie isolate sono praticamente inesistenti. Secondo le stime più autorevoli, forse meno dell'1 per cento di galassie si trova a vagare da solo nello spazio. Il 99 per cento delle galassie è invece raccolto in strutture più o meno dense, alcune molto concentrate, come sono appunto alcuni ammassi di galassie particolarmente ricchi, altre invece molto più estese e allungate. Queste ultime, a seconda che si espandano lungo una o due dimensioni, prendono il nome di filamenti ("filament") o di pareti ("wall"). Nell'Universo locale, gli

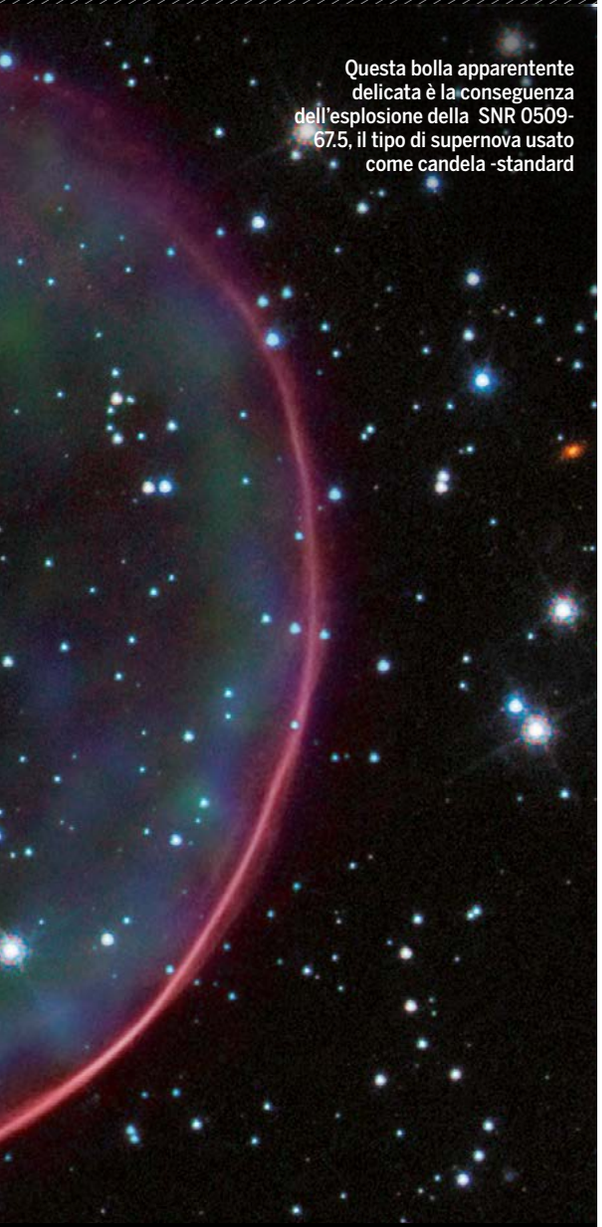
LA SCALA DELLE DISTANZE E LE "CANDELE



NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

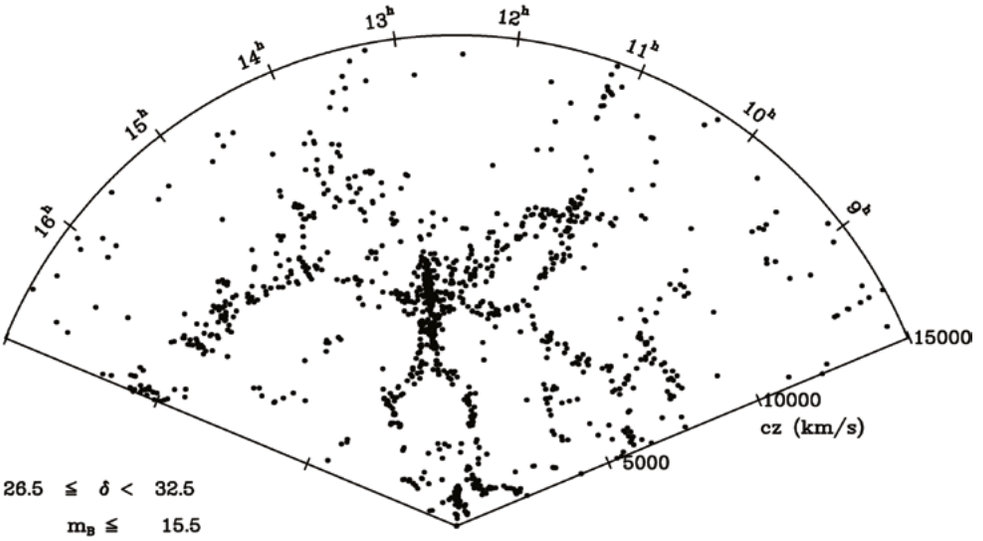
Per i cosmologi è fondamentale ottenere un valore il più possibile preciso della costante di Hubble. Ma per riuscire in questo intento è necessario misurare indipendentemente distanze e velocità di allontanamento per un ampio numero di galassie lontane. Ecco quindi motivata la ricerca di metodi di misura delle distanze cosmologiche. Determinare la scala delle distanze nell'Universo è tuttora uno dei maggiori problemi dell'astronomia.
La luminosità apparente – quella che misuriamo direttamente – di un astro dipende sia dalla sua distanza da noi che dalla sua luminosità intrinseca. Così, dobbiamo conoscere quest'ultima per determinarne la distanza. Ma se esistesse almeno una categoria di corpi celesti che, indipendentemente da tutti gli altri eventuali fattori, avessero la stessa luminosità intrinseca il problema sarebbe facilmente risolto. Gli astri che hanno questa rarissima proprietà vengono definiti tecnicamente "candele standard". In altre parole, la luminosità intrinseca degli oggetti appartenenti ad una classe di candele standard è costante. Fortunatamente per i cosmologi, almeno una categoria di candele standard utili per misurare distanze cosmologiche esiste: sono le supernovae di tipo Ia, esplosioni di stelle compatte (nane bianche) conseguenti al trasferimento di

STANDARD”



Questa bolla apparentente delicata è la conseguenza dell’esplosione della SNR 0509-67.5, il tipo di supernova usato come candela -standard

materia da un’altra stella in un sistema binario. Proprio l’estrema uniformità di questo genere di esplosioni – stessa luminosità di picco, stesso andamento della curva di luce, omogeneità degli spettri – ha fatto sì che gli astronomi abbiano individuato nelle supernovae di tipo Ia un’importante categoria di “candele standard”.
Anche le variabili Cefeidi sono considerate “candele standard”, cioè stelle-campione affidabili da utilizzare come riferimento per la misura delle distanze e sulle quali è possibile calibrare altri metodi, come appunto quello delle supernovae di tipo Ia, per raggiungere distanze ancora maggiori.



La survey CfA2, coordinata da John P. Hucra in collaborazione con Margaret J. Geller, ha messo in luce che la distribuzione delle galassie nello spazio è disomogenea, con zone di altissima concentrazione di galassie e zone invece vuote

ammassi più ricchi di galassie, e quindi più massicci, sono, oltre a quello della Vergine, l’ammasso del Centauro, Abell 3627 (fortemente oscurato dalle polveri galattiche), l’ammasso del Perseo, l’ammasso della Chioma di Berenice, elencati in ordine di distanza da noi e comunque tutti compresi all’interno di un volume di circa 500 milioni di anni luce di diametro. Gli ultimi tre, in particolare, sono diverse volte più grandi e ricchi dell’ammasso della Vergine. All’interno di questo stesso volume si sviluppano anche diversi “wall”, fra cui spiccano il “Coma Wall”, noto anche come “Great Northern Wall”, ovvero grande muraglia settentrionale, e lo “Sculptor Wall”, o “Great Southern Wall” (grande muraglia meridionale), in riferimento alle loro posizioni rispetto al piano della nostra Galassia. Tutti questi “wall” sono tipicamente costituiti da estese strisce di galassie – lunghe anche diverse centinaia di milioni di anni luce – poste quasi come ponti di collegamento fra le zone iperdense rappresentate dagli ammassi e dai superammassi di galassie. Le mappe ottenute dalle diverse “redshift survey” mostrano con grande evidenza che i volumi di spazio compresi fra ammassi, pareti e filamenti sono vuoti di enormi dimensioni, ossia zone in cui la popolazione di galassie è incredibilmente poco numerosa, quando non completamente assente. Questi vuoti (“void”, in inglese) hanno varie dimensioni, da circa 30 a circa 500 milioni di anni luce, ma sempre forma approssimativamente sferica. Fra i vuoti, uno dei più famosi, seppure non sia né il più grande né il meno denso, è il “Bootes void”, scoperto nel 1981 in direzione della costellazione del Bovaro. Nel corso degli anni all’interno di questo vuoto sono state scoperte alcune decine di galassie. Ciò nonostante la sua densità sia notevolmente più bassa rispetto a quella delle zone che lo avvolgono, popolate da ben tre grandi superammassi di galassie: quello di Ercole, quello della Corona Boreale, e quello di Bootes.

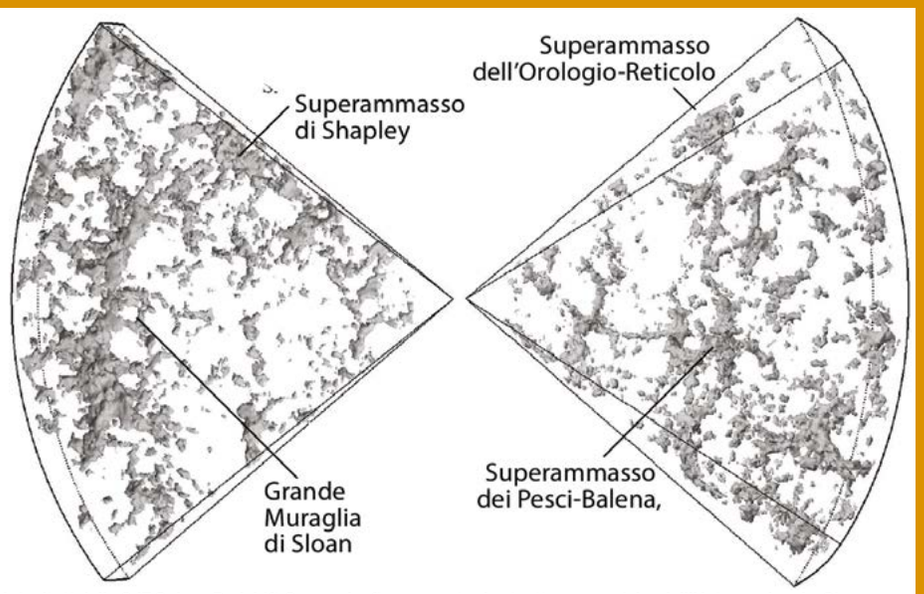
MOTI A GRANDE SCALA

Dalla scoperta dell’esistenza di strutture a grande scala nell’Universo ci si deve aspettare come ovvia conseguenza l’equivalente esistenza di moti a grande scala. In altre parole, le strutture osservate, ammassi, superammassi, filamenti di galassie, sono tutt’altro che statiche, ma sono fortemente dinamiche, ossia animate da moti interni. Purtroppo, a differenza di quanto accade per le stelle della nostra Galassia, è impossibile scomporre il moto di una galassia lontana nelle due componenti radiale (quella misurata dallo spostamento delle righe spettrali) e tangenziale (quella che per una stella è definita dal moto proprio, ovvero dallo spostamento angolare sulla sfera celeste). A causa delle enormi distanze coinvolte, la componente tangenziale del moto di una galassia, seppure presente, è infatti impossibile da misurare,

Smithsonian Astrophysical Observatory

DOPO LA "CFA2 REDSHIFT SURVEY"

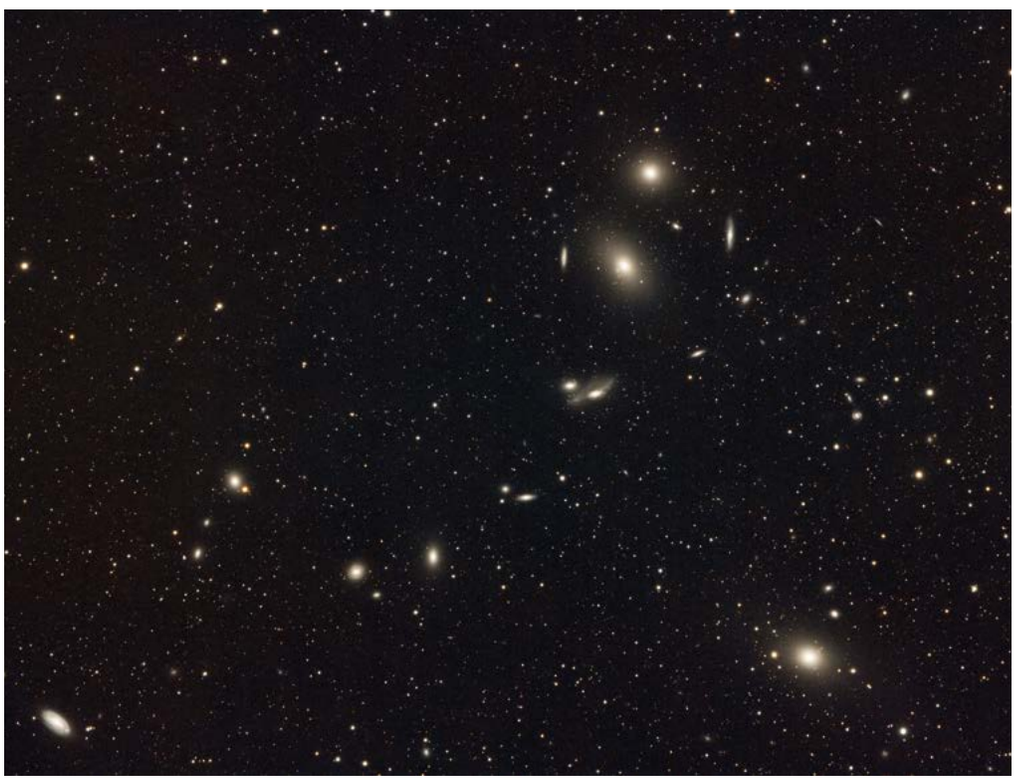
Fra le "redshift survey" più recenti dedicate alla mappatura dell'Universo locale, molto importanti, sia per la mole di dati che per i risultati ottenuti, sono la "2dF Galaxy Redshift Survey" (2dF sta per "2-degree-Field", ovvero "campo di 2 gradi"), la "Galaxy And Mass Assembly survey" (GAMA) e la "Sloan Digital Sky Survey" (SDSS). La prima, condotta fra il 1997 e il 2002 dall'Anglo-Australian Observatory, deriva il suo nome dal fatto che lo strumento permetteva ad ogni puntamento di coprire un campo di cielo ampio 2 gradi quadrati. Nelle 272 notti di osservazione distribuite nei cinque anni dedicate alla "survey" gli astronomi hanno raccolto spettri di oltre 230 mila galassie. La seconda è invece la più estesa survey multibanda (condotta con diversi osservatori, anche spaziali, a diverse lunghezze d'onda), con la quale, fra il 2008 e il 2014, grazie a 210 notti di osservazione, sono stati coperti 286 gradi quadrati di cielo per un totale di circa 300 mila galassie osservate. Come mole di dati raccolti, la "GAMA" è seconda solo alla SDSS, iniziata nel 2000 e attualmente giunta alla sua quarta estensione (SDSS IV). Solo nella sua prima fase, durata fino al 2005, la SDSS, condotta dall'Apache Point Observatory (New Mexico, Stati Uniti), ha coperto oltre 7500 gradi quadrati e raccolto spettri di più di 800 mila galassie e 100 mila quasar, permettendo la creazione di mappe dettagliatissime dell'Universo locale. Adesso, i gradi quadrati di cielo coperti dalle osservazioni sono arrivati a 14555 (oltre il 35 per cento di cielo), con osservazioni fotometriche di circa 500 milioni di oggetti e osservazioni spettroscopiche di oltre tre milioni di oggetti. Alla mappatura della distribuzione di galassie più lontane sono invece dedicate altre due importanti "survey": la "DEEP2 Redshift Survey", condotta con i telescopi Keck e volta a studiare circa 60 mila galassie ad alto redshift, e la "VIMOS-VLT Deep Survey" (VVDS), raccolta di oltre 150 mila spettri di galassie a distanze cosmologiche condotta con il Very Large Telescope (VLT) dello European Southern Observatory (ESO), sulle Ande cilene, e alla quale partecipa anche un folto gruppo di ricercatori italiani.



I risultati della 2dF Galaxy Redshift Survey. La figura mostra le strutture cosmiche dell'Universo locale. Si distinguono diversi superammassi, come la Grande Muraglia di Sloan, il Superammasso di Shapley, parte dei Pesci-Balena, e parte dell'Orologio-Reticolo. L'indagine 2dF ha coperto un'area di circa 1500 gradi quadrati

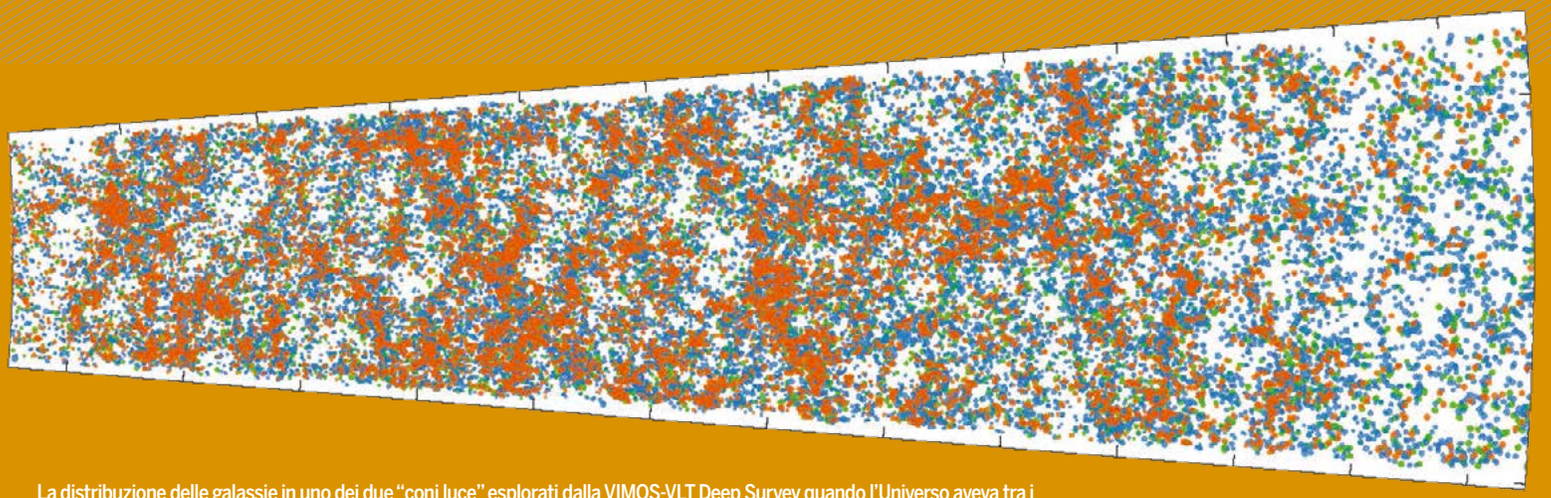
quand'anche una galassia si muovesse alla velocità della luce. Così gli astronomi devono accontentarsi di conoscere la componente radiale del moto di una galassia, cioè quella che si sviluppa lungo la linea di vista. E qui sorge il problema. I moti cosiddetti peculiari, ovvero quelli propri delle galassie all'interno degli ammassi, dovuti all'azione di reciproca attrazione

AREE DI DENSITÀ ESTREMAMENTE BASSA SI ALTERNANO A ZONE A CONCENTRAZIONE ELEVATA DI GALASSIE

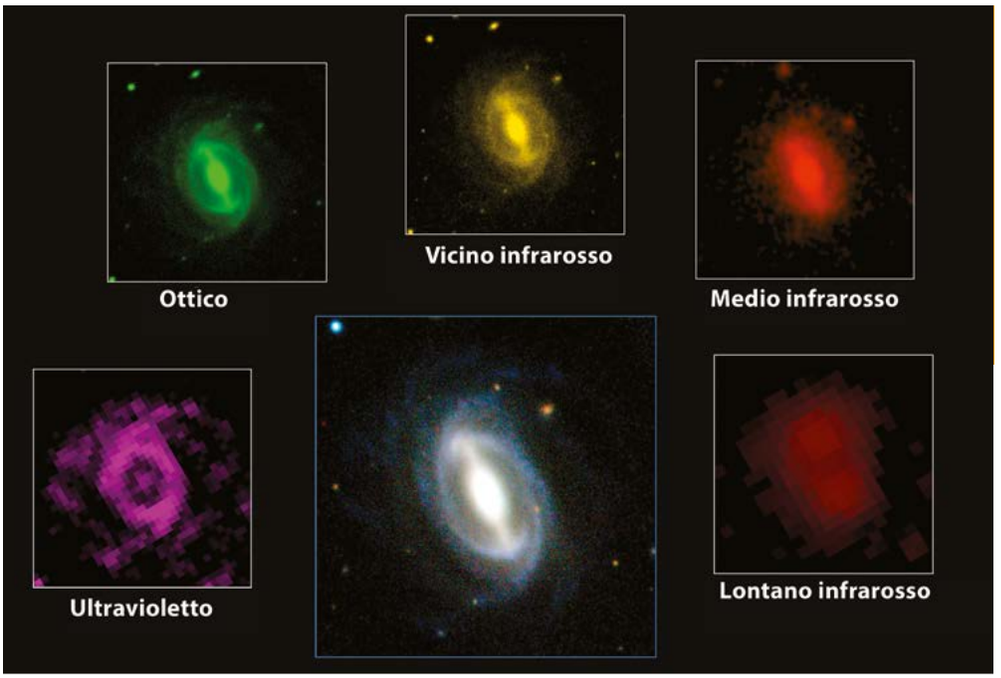


Più di 760 galassie sono presenti in questa immagine dell'ammasso della Vergine. La maggior parte di esse sono distanti 1300-1700 milioni di anni luce

Kapteyn Institute, U. Groningen et al., 2dF Galaxy Redshift Survey. Kees Scherer. Knight Observatory, Tomar, Portogallo



La distribuzione delle galassie in uno dei due "coni luce" esplorati dalla VIMOS-VLT Deep Survey quando l'Universo aveva tra i 5 e i 9 miliardi di anni di vita. I pallini rosso/arancio sono galassie, di tipo ellittico, quelli blu/verdi sono galassie di tipo a spirale o irregolare nella quali è ancora in atto formazione stellare

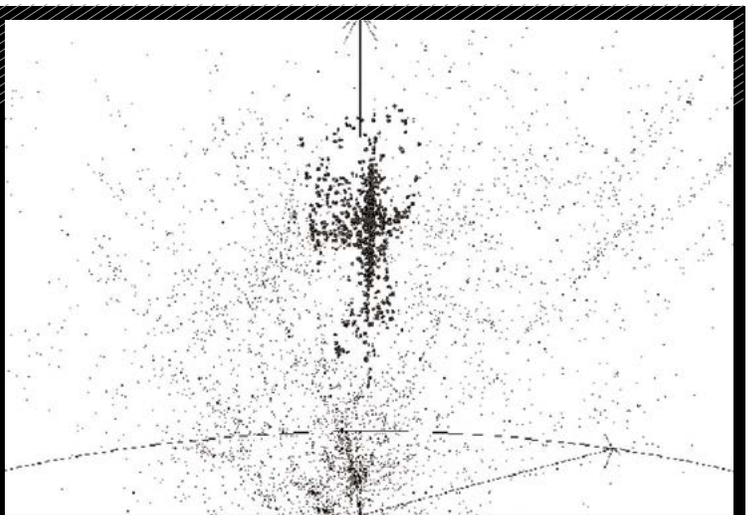


Una galassia tipica ripresa a diverse lunghezze d'onda nella survey GAMA. Questo progetto ha misurato la produzione di energia di più di 200.000 galassie e ha stimato la produzione energetica dell'Universo locale

gravitazionale sempre presente fra le galassie appartenenti a un sistema legato come è un ammasso di galassie, sono infatti sovrapposti al "flusso di Hubble", ovvero al moto collettivo di espansione dell'Universo.
Questo implica che quando si va a misurare il redshift di una galassia,

IL DITO DI DIO

Mappando le galassie nello spazio dei redshift si verificano talvolta dei curiosi "artefatti". Uno dei quali, noto con il nome di "dito di Dio", è causato dalla presenza di alte velocità peculiari all'interno degli ammassi di galassie. Queste velocità, infatti, se vengono tradotte in distanze secondo la legge di Hubble (ovvero considerandole dovute al moto di espansione dell'Universo), fanno apparire l'ammasso molto allungato lungo la linea di vista, creando l'illusione di un lungo corteo di galassie puntato verso di noi: il "dito di Dio", appunto.



L'immagine mostra una visione tridimensionale della distribuzione delle galassie in cui i membri dell'ammasso della Chioma sono stati evidenziati per mostrare il caratteristico "dito di Dio"

B. Granett & the VIPERS team. ICRAR/GAMA ed ESO. Infrared Processing & Analysis Center (IPAC)

in realtà questo è il risultato della composizione di due spostamenti di righe: uno dato dal "redshift cosmologico", l'altro dato dalla componente radiale del moto peculiare della galassia all'interno dell'ammasso. Ma quest'ultima, proprio perché specifica della galassia, può essere sia in avvicinamento – causando uno spostamento verso il blu delle righe spettrali – che in allontanamento – con conseguente ulteriore spostamento verso il rosso – da noi, causando così l'osservazione delle righe spettrali in posizioni diverse da quelle in cui si troverebbero se la galassia fosse partecipe del solo moto di espansione dell'Universo. Gli astronomi hanno quindi dovuto ideare dei metodi per misurare le distanze delle galassie indipendentemente dalla legge di Hubble, potendo così separare la parte peculiare del moto da quella cosmologica. Fra i moti a grande scala che vedono la nostra Galassia coinvolta direttamente c'è la cosiddetta "Virgo infall", ovvero la caduta del nostro Gruppo Locale verso l'ammasso

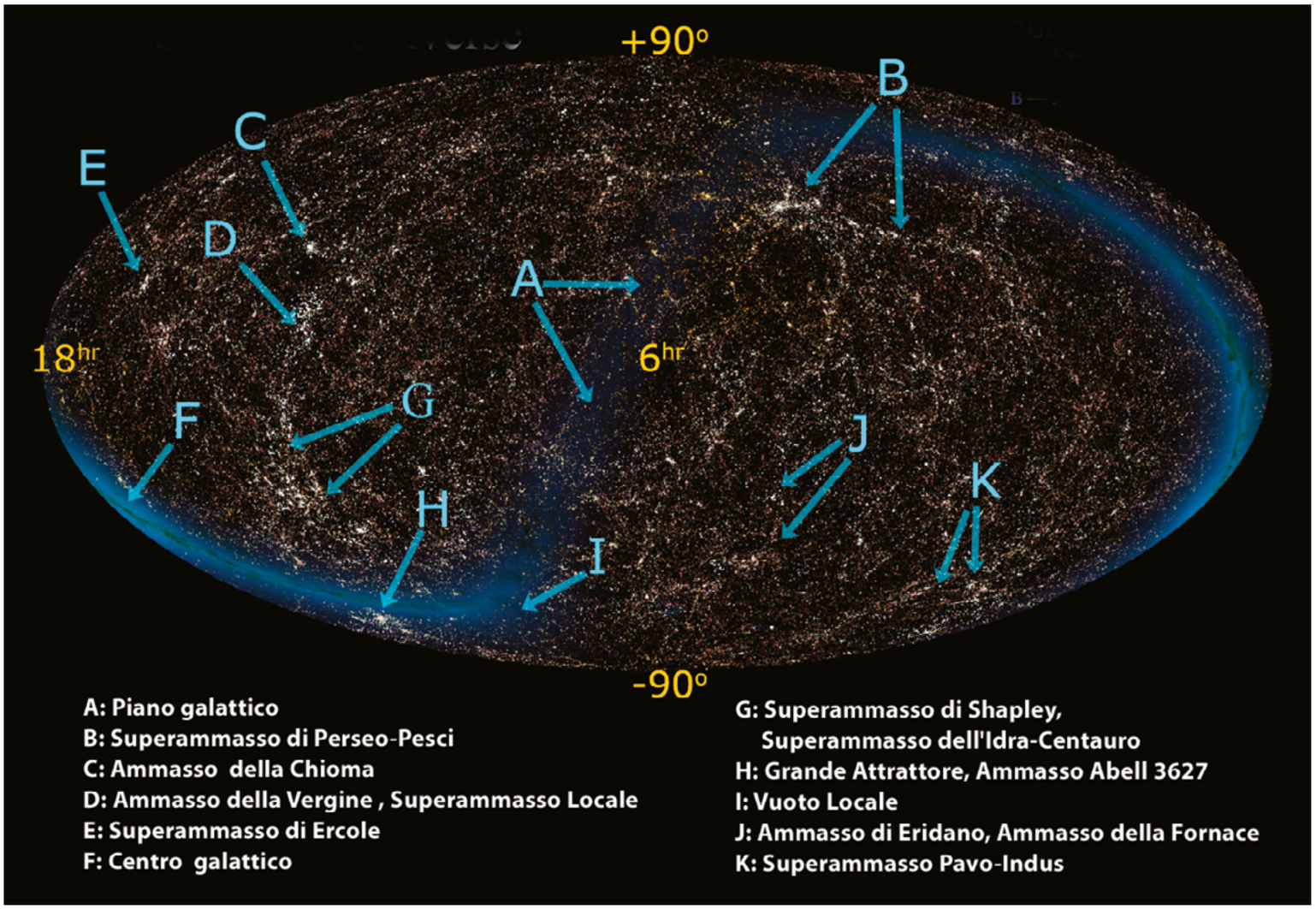
MOTI INTERNI DINAMICI ANIMANO AMMASSI, SUPERAMMASSI, E GALASSIE

METODI INDIPENDENTI DALLA LEGGE DI HUBBLE

Impiegando le stelle pulsanti di tipo Cefeide come "calibro" nella scala delle distanze, gli astronomi sono riusciti a individuare diversi altri metodi di stima, fra i quali particolarmente interessanti dal punto di vista fisico sono quelli che mettono in relazione le velocità delle stelle di una galassia con la sua luminosità intrinseca.
In particolare, la "relazione di Tully-Fisher" stabilisce una corrispondenza fra le velocità di rotazione delle stelle del disco di una galassia a spirale e la sua luminosità intrinseca, mentre la "relazione di Faber-Jackson" (adesso compresa in una relazione più generale denominata "piano fondamentale delle galassie ellittiche") lega la dispersione delle velocità stellari all'interno di una galassia ellittica alla sua luminosità assoluta. La dispersione è l'ampiezza dell'intervallo all'interno del quale si raccolgono le velocità delle stelle attorno al centro della galassia – ricordiamo che in una galassia ellittica le velocità sono distribuite casualmente in ogni direzione, mentre nei dischi delle galassie a spirale la velocità è ordinata in un preciso senso di rotazione.
Tenendo conto che la luminosità intrinseca di una galassia è in qualche modo collegata alla sua massa complessiva e quindi al suo campo gravitazionale, è naturale attendersi che più grande è la massa di una galassia, maggiori saranno sia le velocità delle stelle sia la luminosità complessiva del sistema.
Oltre alle relazioni di Tully-Fisher e di Faber-Jackson, altri metodi sfruttano le proprietà omogenee di classi di oggetti particolari presenti nelle galassie – come le dimensioni delle regioni HII (HII è l'idrogeno ionizzato; si tratta di nebulose brillanti illuminate da stelle calde e giovani in formazione), la funzione di luminosità delle nebulose planetarie, quella degli ammassi globulari, la luminosità delle stelle più brillanti – o delle galassie stesse – come la galassia più brillante di un ammasso o le fluttuazioni della luminosità superficiale. Naturalmente, per poter essere affidabili, tutti questi metodi necessitano di taratura attraverso un qualche tipo di candela standard.

Una delle immagini astronomiche più particolareggiate mai prodotte: assemblando i dati raccolti in 105 orbite l'HST ha ripreso con un dettaglio senza precedenti la Nebulosa di Orione, una movimentata regione di formazione stellare. La ripresa mostra più di 3000 stelle di varie dimensioni e il turbolento agitarsi delle polveri e dei gas.

NASA, ESA, M. Robberto e The Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team



La mappa, realizzata nel corso della The Two Micron All Sky Survey (2MASS), mostra l'orientamento equatoriale e la localizzazione delle struttura a grandi scala nell'Universo locale

IL PRINCIPIO COSMOLOGICO E LA "END OF GREATNESS"

I cosmologi si aspettano che, a grandissima scala, l'Universo sia isotropo e omogeneo, ovvero che si mostri uguale in tutte le direzioni (isotropia, o invarianza per rotazioni) e che ovunque mostri le stesse caratteristiche fisiche (omogeneità, o invarianza per traslazioni). In altre parole, questo significa che nell'Universo non esistono né punti né direzioni privilegiate.
Questa richiesta, espressa sotto forma di principio, e nota come "principio cosmologico", è stringente e delimita fortemente le caratteristiche dei modelli cosmologici. Ma, nonostante l'isotropia sia stata dimostrata in maniera incontrovertibile dalle osservazioni ad alta risoluzione della radiazione cosmica di fondo, la scoperta dell'omogeneità tarda ad arrivare. Anche se le "survey" più recenti sembrano dimostrare che, su una scala osservativa approssimativamente di 300 milioni di anni luce, le forti disomogeneità osservate nell'Universo locale – ammassi, filamenti, vuoti – sembrano sparire.
In pratica, questo significa che l'omogeneità della materia nell'Universo non si rivela fino a che non lo si osserva su scale di alcune centinaia di milioni di anni luce. Scale di distanze che si sono appunto iniziate a coprire con le "survey" soltanto a partire dagli anni Novanta del secolo scorso. La scala alla quale l'Universo si rivela finalmente omogeneo è stata chiamata "End of Greatness", fine della grandezza, espressione con la quale si intende che non esistono strutture a larga scala di dimensioni maggiori di questa.

di galassie della Vergine, al quale è appunto legato gravitazionalmente. Ma ancora più sconvolgente per le dimensioni e le masse coinvolte è il moto collettivo delle galassie e degli ammassi di galassie compresi in un volume di spazio di centinaia di milioni di anni luce di diametro verso un'anomalia gravitazionale posta a circa 250 milioni di anni luce da noi in direzione delle costellazioni dell'Idra e del Centauro.
È là che si cela il famoso "Grande Attrattore", la cui forza gravitazionale influenza 100.000 galassie, cui contribuisce certamente l'ammasso Abell 3627, ma di cui purtroppo è difficile svelare interamente la natura a causa del fatto che si trova praticamente immerso nella cosiddetta "Zone of Avoidance", ovvero in quella regione del piano della nostra Galassia quasi completamente oscurata dalle polveri. ■

Infrared Processing & Analysis Center (IPAC)

Una nuvola di polvere e di gas nella costellazione dell'Unicorno. La nebulosa, è situata alla periferia di un braccio spirale esterno della nostra Galassia. In un ambiente analogo hanno avuto origine i pianeti del Sistema Solare

LA NASCITA DEL SISTEMA SOLARE

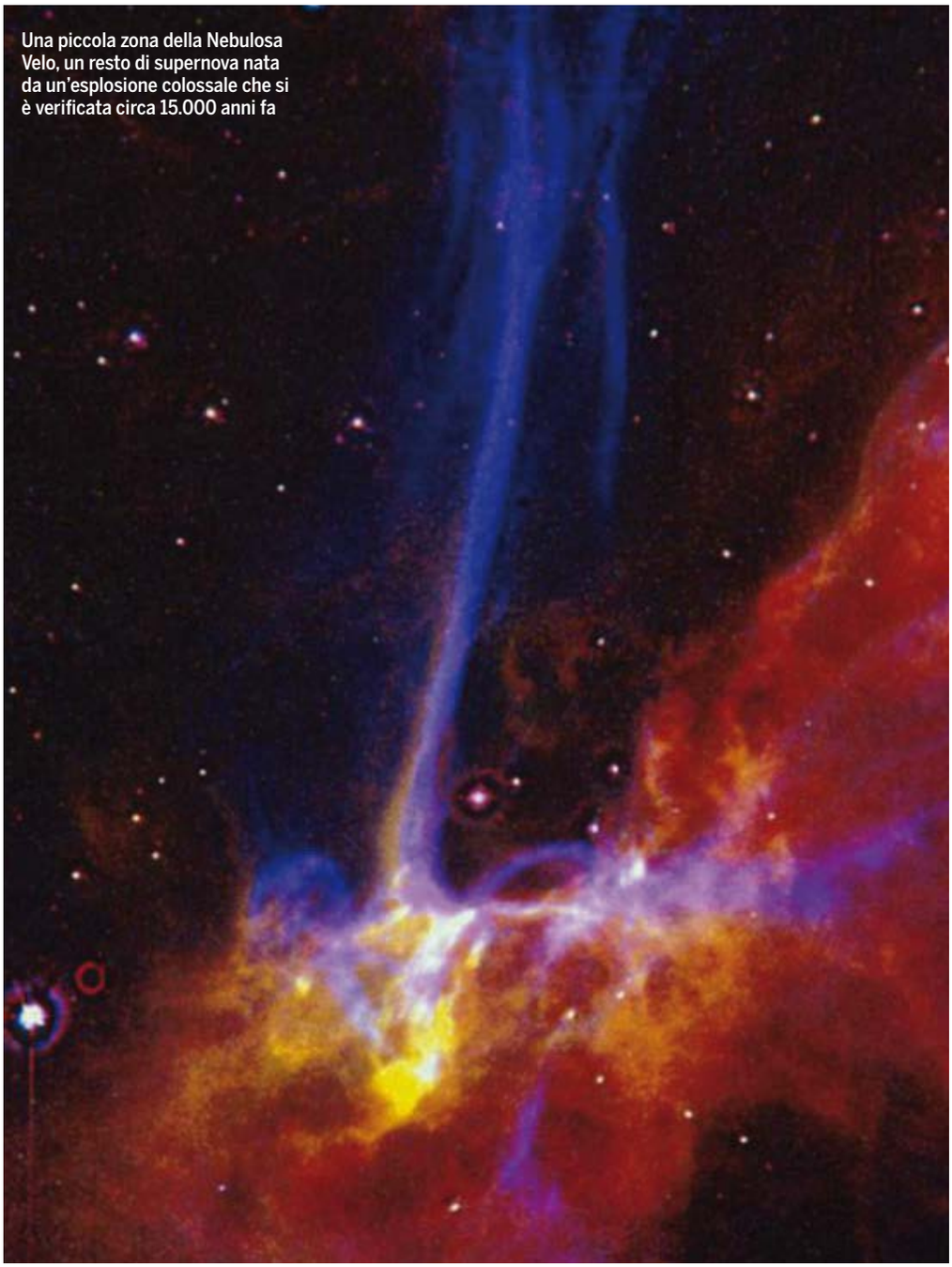
Un lungo viaggio da una periferia fredda e nuvolosa, imbattendosi in violente esplosioni, finendo in spericolate rotazioni, colpiti da urti di materiali vaganti nello spazio. Questa l'avventurosa "preistoria" dei pianeti che danzano attorno al Sole

NASA, JPL-Caltech, UCLA

Un montaggio dei pianeti del Sistema Solare con una cometa e un asteroide

Le origini del Sistema Solare si fanno risalire a circa 5 miliardi di anni fa, quando, in una zona periferica di un braccio di spirale della nostra Galassia, un'enorme e freddissima nube di gas e polveri iniziò a frammentarsi in nubi più piccole, che a loro volta iniziarono a condensarsi. All'origine di questa instabilità, e quindi ad avviare questo processo di frammentazione e successiva condensazione, fu con ogni probabilità l'esplosione di una supernova vicina (o anche di più supernove). Nell'esplosione, queste stelle morenti, di una generazione precedente a quella del Sole – che appunto doveva ancora nascere – rilasciarono nello spazio circostante gran parte del

NASA/JPL



Una piccola zona della Nebulosa Velo, un resto di supernova nata da un'esplosione colossale che si è verificata circa 15.000 anni fa

materiale che le costituiva, ricco di molti elementi chimici sintetizzati sia all'interno della stella che, soprattutto, al momento dell'esplosione, attraverso una lunga e complessa serie di reazioni nucleari, all'interno della nube di gas in rapida e violenta espansione. Durante questo processo, che prende il nome di nucleosintesi, partendo dagli elementi leggeri, come l'idrogeno, l'elio, il carbonio, l'azoto e l'ossigeno, si arriva infatti a sintetizzare elementi più pesanti, come per esempio il silicio, il calcio, il ferro e il nichel. Così, questi elementi, eiettati con violenza dalle esplosioni di queste supernove, andarono a mescolarsi con quelli della nube madre, arricchendola di materiali dai quali poi si sarebbero formate le stelle della generazione successiva, come il Sole, appunto.

Secondo la teoria del Big Bang, infatti, al termine dei primi minuti in cui l'Universo era sufficientemente caldo da innescare reazioni termonucleari, gli unici elementi presenti erano essenzialmente idrogeno ed elio. Sono solo questi due gli elementi primordiali. Fu la successiva evoluzione stellare, in particolare con le esplosioni di supernove, a lasciare in eredità alle nebulose gli elementi che oggi formano il Sole, i pianeti, e anche il nostro corpo. D'altra parte, dalla nascita dell'Universo alla nascita del Sistema Solare passarono quasi 10 miliardi di anni: un tempo più che sufficiente perché questo processo di arricchimento dell'Universo di elementi pesanti potesse realizzarsi.

LA NEBULOSA PRIMORDIALE

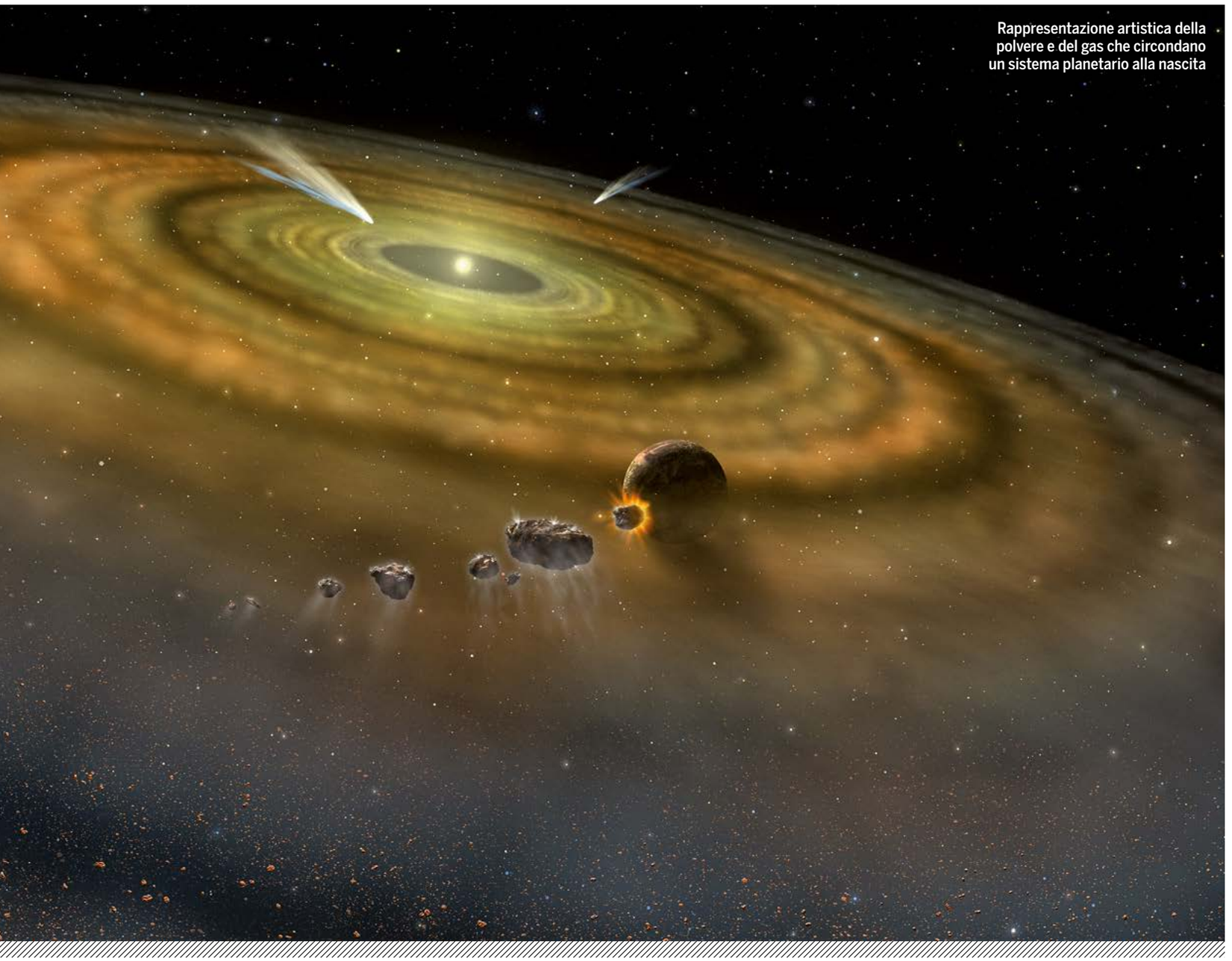
Ma ritorniamo alla nube madre di gas e polveri e alla sua frammentazione. Uno di questi frammenti più piccoli, infatti, forse sempre a causa dell'onda d'urto dovuta all'esplosione di una supernova vicina, iniziò a ruotare lentamente su se stesso e nel contempo a contrarsi, non essendo in grado di sostenere il proprio

NASA e J.J. Hester Arizona State University

peso: era la nebulosa che avrebbe dato origine al nostro Sistema Solare. Nella contrazione la parte centrale iniziò a riscaldarsi, mentre la rotazione portò la nube ad appiattirsi sempre di più, sino a diventare un vero e proprio disco di materia in rotazione. È qui che entra in gioco una legge fondamentale della dinamica nota come principio di conservazione del momento angolare, un principio che vediamo per esempio in azione quando una ballerina fa una piroetta su se stessa prima allargando le braccia e poi stringendole a sé. Quando la ballerina è a braccia tese, la sua rotazione è più lenta, mentre quando le raccoglie verso il corpo, la sua rotazione diviene più veloce. Questo

CONTRAZIONE E ROTAZIONE SONO I MECCANISMI CHE HANNO DATO ORIGINE AL SISTEMA SOLARE

cambiamento di velocità di rotazione in seguito al cambiamento di distribuzione della massa rotante (le braccia, prima lontane, poi vicine al corpo) è appunto una conseguenza diretta del principio di conservazione del momento angolare, una grandezza fisica associata ai moti rotatori che dipende appunto dalla massa del corpo, dalla sua distribuzione rispetto all'asse di rotazione e dalla sua velocità di rotazione. Lo stesso principio, applicato alla nube rotante in contrazione, portò la rotazione a diventare sempre più rapida con il progredire della contrazione, fino a quando la materia del disco si organizzò attorno a un nucleo via via più massiccio, con un grosso proto-Sole al centro e una residua massa distribuita in un sottile piano, quello dove oggi essenzialmente poggiano le orbite dei pianeti.

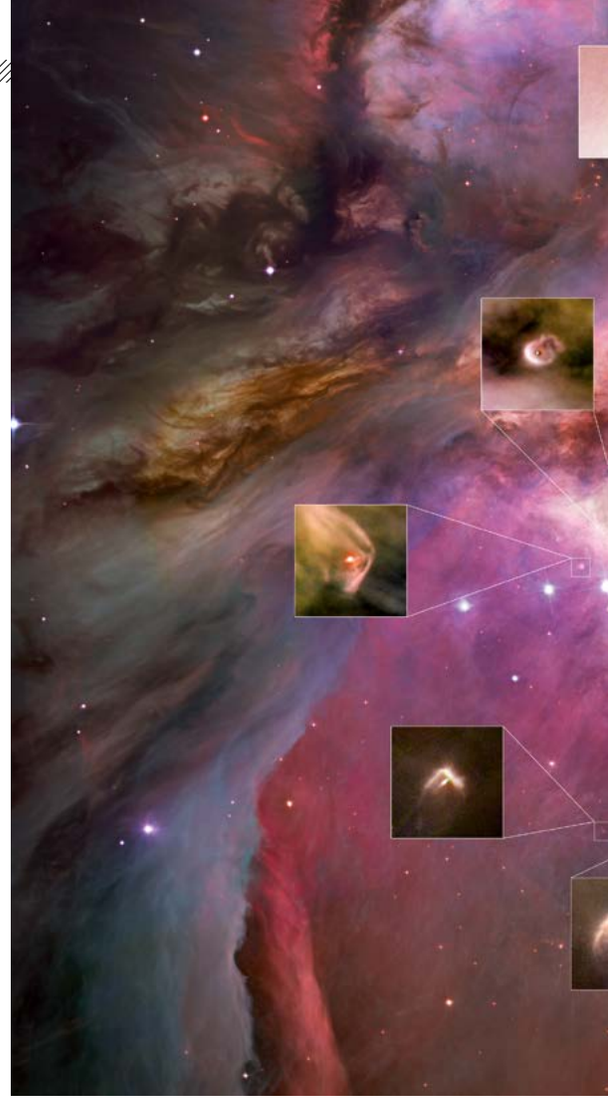


Rappresentazione artistica della polvere e del gas che circondano un sistema planetario alla nascita

NASA

IL DISCO PROTO-PLANETARIO

Gli astronomi chiamano disco proto-planetario questa nube di gas e polveri appiattita e in rotazione con un rigonfiamento centrale caldo. Seppure nessuno ovviamente sia stato testimone della nascita del Sistema Solare, si hanno comunque prove osservative importanti che questo sia effettivamente il meccanismo seguito per dare origine a nuove stelle e a nuovi sistemi planetari. Per esempio, immagini ad alta risoluzione riprese dal telescopio spaziale Hubble dell'interno della grande Nebulosa di Orione (la più importante nursery stellare che si trova nelle vicinanze del nostro sistema planetario) mostrano chiaramente diversi dischi protoplanetari che hanno dimensioni paragonabili a quelle del nostro Sistema Solare: una prova importante non solo del fatto che queste strutture sono abbondanti, ma anche della frequenza con cui si verifica la formazione di pianeti attorno ad altre stelle, anche se manca ancora una comprensione completa di tutti i dettagli del meccanismo di formazione. Durante la fase di contrazione gravitazionale, il progressivo raffreddamento del disco portò alla solidificazione del materiale secondo una sequenza dipendente dalla temperatura: andando dalle temperature di fusione più alte verso quelle più basse, prima condensarono i minerali refrattari, poi i composti metallici, successivamente i silicati e infine i vari ghiacci (di acqua, di metano, di ammoniaca e così via). Con ogni probabilità fu proprio in questa prima fase che si formarono delle piccole gocce di polveri di forma sferica, denominate condruli, che si osservano inglobate nella roccia di alcune meteoriti primitive, in cui si trovano alcuni minerali refrattari ancora più antichi. Proprio perché contengono i condruli, questa tipologia di meteoriti prende il nome di condriti. Il meccanismo che ha dato origine ai condruli è una fusione causata da un rapido evento termico seguito da un altrettanto brusco raffreddamento.



I PLANETESIMI

A questo punto dell'evoluzione della nebulosa proto-planetaria, ancora in fase di contrazione sotto l'effetto della

I planetesimi si formano con il meccanismo di accrescimento: aggregando polvere e materiali grazie alla forza di attrazione gravitazionale

NASA

Sopra, illustrazione di un disco protoplanetario che circonda una stella simile al Sole

A lato, la splendida Nebulosa di Orione ospita decine di "embrioni" di sistemi planetari. Questa immagine evidenzia i sei candidati stimati con più potenziale

propria gravità, ci troviamo dunque con al centro un rigonfiamento molto denso e caldo, a causa della compressione del gas, attorno al quale ruotano anelli di materia, composti da piccoli frammenti di polveri e gas ghiacciati. Nel giro di pochi milioni di anni, la forza di gravità ha fatto sì che i materiali in orbita su ogni anello si addensassero a formare pianetini di roccia e ghiaccio simili alle comete, seguendo un meccanismo di accrescimento di frammenti via via sempre più grandi, prodotti da urti e catture di frammenti più piccoli. Furono le deboli forze attrattive tra tali particelle che, con il passare del tempo, portarono alla formazione di corpi sempre più grandi, sino ad arrivare ai planetesimi, di dimensioni chilometriche. I planetesimi più grandi, infine, ripulirono via via le orbite lungo le quali si muovevano, catturando grazie alla forza di attrazione gravitazionale quelli più piccoli che venivano a trovarsi nelle loro vicinanze, fino a formare corpi di dimensioni sempre maggiori mediante un meccanismo detto di accrezione. Dopo circa un milione di anni dal raffreddamento della nebulosa solare, nel rigonfiamento centrale stava iniziando ad accendersi il proto-Sole, la cui intensa radiazione elettromagnetica e la violenta emissione di particelle estremamente veloci dalla sua superficie (il cosiddetto vento solare, costituito da protoni e altri nuclei atomici) causarono una ridistribuzione della materia presente nelle sue vicinanze: il gas nella zona interna venne infatti tutto spazzato via verso l'esterno, mentre nelle zone più vicine alla proto-stella rimasero solo i materiali più pesanti e refrattari. Così, i corpi più lontani, come Giove e Saturno, ricevettero ghiaccio e gas, mentre quelli vicini, come, la Terra e Marte, conservarono i materiali refrattari acquisendo una struttura rocciosa.

I FRAMMENTI SI AGGREGANO, DIVENTANO SEMPRE PIÙ GRANDI E SI ORGANIZZANO INTORNO A UN PROTO-SOLE

LA DISTRIBUZIONE CHIMICA DEI PIANETI

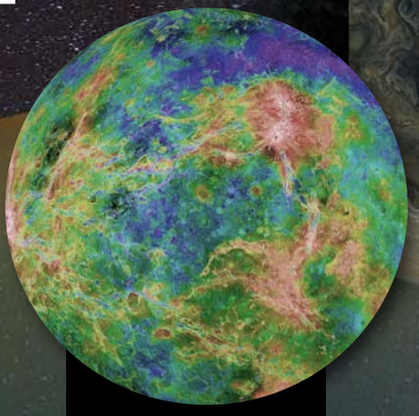
È da questo momento che il nostro sistema planetario assume la configurazione che conosciamo, con i pianeti giganti gassosi (Giove, Saturno, Urano, Nettuno) nella parte più esterna, formatisi per accrezione dei planetesimi ghiacciati e ricchi di volatili, e i pianeti terrestri rocciosi

continua a pag **44**

NASA, ESA, M. Robberto-STSI/ESA, the HST Orion Treasury Project Team and L. Ricci-ESO/Neb. di Orione, NASA/JPL-Caltech/disco protoplanetario

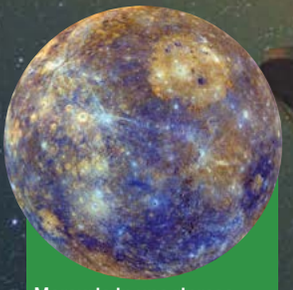
IL SISTEMA SOLARE

In greco "planetes" significa "errante" e, come abbiamo letto, il percorso nel tempo dei pianeti è stato un lunghissimo vagabondaggio durante il quale, attraverso complessi processi, hanno acquisito l'aspetto con il quale li conosciamo. E non ci sono solo pianeti nel Sistema Solare, ma satelliti, asteroidi, comete.
Queste riprese, catturate da diverse sonde spaziali, offrono un'idea della morfologia e della struttura di alcuni di questi protagonisti del cielo.



La sonda Magellano, tra il 1990 e il 1994 orbitò intorno a Venere riuscendo a mappare il pianeta come mai in precedenza

NASA/JPL/USGS



Mercurio in una ripresa della sonda MESSENGER. I colori indicano le differenze chimiche, mineralogiche e fisiche della rocce

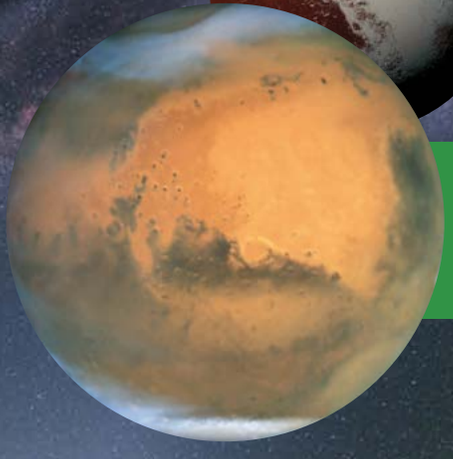
NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/ Carnegie Institution of Washington

L'emisfero orientale del nostro pianeta ripreso dalla sonda Terra

NASA, Reto Stöckli, basata su dati NASA e NOAA

Plutone fotografato il 14 luglio 2015 nel corso della missione New Horizons

NASA / Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory / Southwest Research Institute



Marte ripreso dal Telescopio Spaziale Hubble il 26 giugno 2001

NASA and The Hubble Heritage Team

La Via Lattea ripresa dall'altipiano Chajnantor sulle Ande cilene dove opera l'European Southern Observatory

Yuri Beletsky (Las Campanas Obs., Carnegie Institution)

P. HORÁLEK/ESO

Giove in una sequenza di riprese realizzate dalla sonda Juno. Questa missione NASA ha come obiettivo lo studio del campo magnetico di Giove

NASA/SWRI/MSSS/Gerald Eichstadt/Sean Doran

Saturno in un'immagine in falsi colori realizzata dal Telescopio Spaziale Hubble il 3 gennaio 1998 combinando tre diverse riprese

NASA/E. Karkoschka (University of Arizona)

Nettuno ripreso dal Voyager 2 tra il 16 e il 17 agosto 1989

NASA/JPL

Urano ripreso dal Telescopio Spaziale Hubble nel 2005

NASA, ESA, and M. Showalter (SETI Institute)

Sullo sfondo una porzione del cratere Orion di Marte fotografato lo scorso aprile dal rover della missione NASA Opportunity. I colori indicano le differenze nei materiali di superficie

NASA/JPL-Caltech/Cornell Univ./ Arizona State Univ.

Il vulcano Maat Mons di Venere in una prospettiva tridimensionale generata dal computer con i dati dalla sonda Magellano

NASA/JPL

segue da pag **41**

(Mercurio, Venere, Terra, Marte), ricchi di minerali refrattari, metalli e silicati, nella parte più interna e vicina al Sole. La capacità dei pianeti gassosi di trattenere il gas fu naturalmente legata alle loro dimensioni: se a quel tempo il proto-pianeta in formazione era già abbastanza grande, come poteva esserlo il proto-Giove, allora la sua gravità fu in grado di trattenere il gas nebulare spazzato via dal proto-Sole verso l'esterno per diventare quindi un pianeta gigante. Le dimensioni dei pianeti interni (e degli asteroidi nella fascia compresa fra Marte e Giove) e la loro relativa vicinanza alla proto-stella impedirono invece a questi corpi di trattenere il gas, e rimasero pertanto corpi rocciosi. Oltre Nettuno, infine, si hanno corpi essenzialmente composti da frammenti di rocce e ghiacci, fra cui naturalmente le comete. Questi corpi sono composti dal materiale residuo della formazione del Sistema Solare e hanno dimensioni tali da non riuscire a trattenere un'atmosfera. Mentre il proto-Sole diventava Sole raggiungendo nel nucleo, sempre grazie al

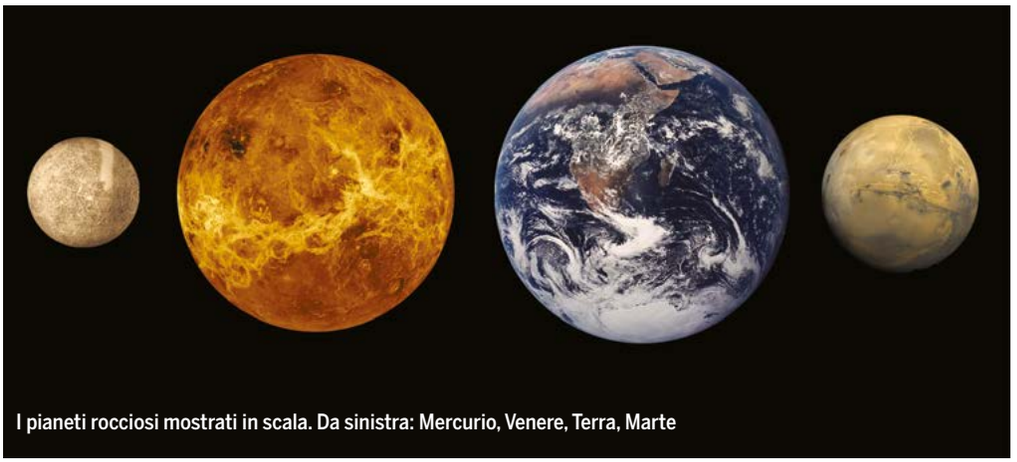
PIANETI INTERNI ROCCIOSI E PIANETI ESTERNI GASSOSI: UNA QUESTIONE DI CHIMICA

I CORPI MINORI DEL SISTEMA SOLARE: SATELLITI, ASTEROIDI E COMETE

Il Sistema Solare non è costituito soltanto dal Sole e dagli otto pianeti (Plutone è ormai declassato a pianeta nano, assieme all'asteroide Cerere e ad altri corpi ghiacciati in orbite molto lontane dal Sole). Sono infatti tantissimi i corpi cosiddetti minori, a partire per esempio dalla moltitudine di satelliti che orbita attorno a molti di questi pianeti. Giove e Saturno ne hanno addirittura a decine e solo Mercurio e Venere non hanno alcun satellite a fare loro compagnia. Ma il corteo di satelliti non è l'unica raccolta di corpi minori. A migliaia infatti si contano gli asteroidi (o pianetini), corpi le cui orbite si trovano soprattutto nella cosiddetta "fascia degli asteroidi", un'estesa zona del Sistema Solare compresa fra le orbite di Marte e Giove. Esiste però anche un gruppo sempre più numeroso di oggetti "trans-nettuniani", con orbite oltre quella di Nettuno, mentre un gruppo di asteroidi ha orbite che intersecano quella della Terra. Nessuno di questi è attualmente in rotta di collisione con noi, ma i loro movimenti vengono costantemente tenuti sotto controllo da una rete di osservatòri terrestri, che continua a scoprirne sempre di nuovi.
"Pezzi di ghiaccio sporco", le comete sono costituite dal materiale residuo della formazione del Sistema Solare. Restano invisibili fino a che non si avvicinano al Sole, sotto l'effetto della cui radiazione sviluppano una chioma luminosa e una coda di gas e polveri talvolta molto estesa ma sempre tenuissima. Molte comete percorrono orbite fortemente ellittiche arrivando dalle estreme propaggini del Sistema Solare e con periodi anche di migliaia o milioni di anni, molte altre passano una sola volta vicino al Sole per non tornare mai più.
La cometa più famosa è sicuramente la cometa (di) Halley, con un periodo di circa 76 anni, osservata anche da Giotto nel suo passaggio del 1301. Forse la cometa raffigurata nell'affresco della natività nella Cappella degli Scrovegni a Padova è proprio quella di Halley. Ma l'inventario non finisce qui. Una quantità di innumerevoli frammenti e polveri interplanetarie è diffusa per tutto il Sistema Solare. Il fenomeno delle "stelle cadenti" è proprio dovuto a questi piccoli grani di polvere, detti meteoroidi, che, penetrando nell'atmosfera terrestre, bruciano tracciando una scia luminosa. Molti meteoroidi orbitano attorno al Sole in sciami: quando la Terra ne incrocia uno, si origina una pioggia meteorica. Lo sciame più famoso è quello delle Perseidi, che genera una pioggia attorno al 10 agosto, le "lacrime di San Lorenzo". Quando una meteora, a causa delle dimensioni e della consistenza, riesce ad arrivare al suolo non consumandosi interamente, prende il nome di meteorite.

Joshua Tree National Park, Commons

riscaldamento causato dalla contrazione gravitazionale, la temperatura sufficiente ad accendere finalmente la reazione di fusione dell'idrogeno in elio (e a fermare quindi il processo di contrazione), i planetesimi continuavano il processo di accrezione scontrandosi fra loro e accumulando polveri. Alcuni di quelli rocciosi, come la Terra, divennero tanto grandi che la pressione al centro fece nuovamente fondere le rocce. Così, i materiali più pesanti, come il ferro e il nichel, affondarono nel nucleo, mentre all'esterno si formò un mantello di silicio, magnesio e altri minerali fusi, sul quale galleggiava una sottile crosta solida. Era nato il nostro pianeta. Non tutto il materiale orbitante attorno al Sole riuscì a completare questo percorso di formazione per arrivare a dare origine a un pianeta compiuto. Fra Marte e Giove, infatti, a causa delle perturbazioni orbitali causate dalla presenza ravvicinata di Giove, il più massiccio fra i pianeti, non fu infatti possibile quel processo di aggregazione necessario per creare un vero pianeta, così che adesso troviamo una miriade di corpi minori, gli asteroidi, che sono sostanzialmente parte del materiale residuo delle fasi iniziali di formazione del Sistema Solare. ■

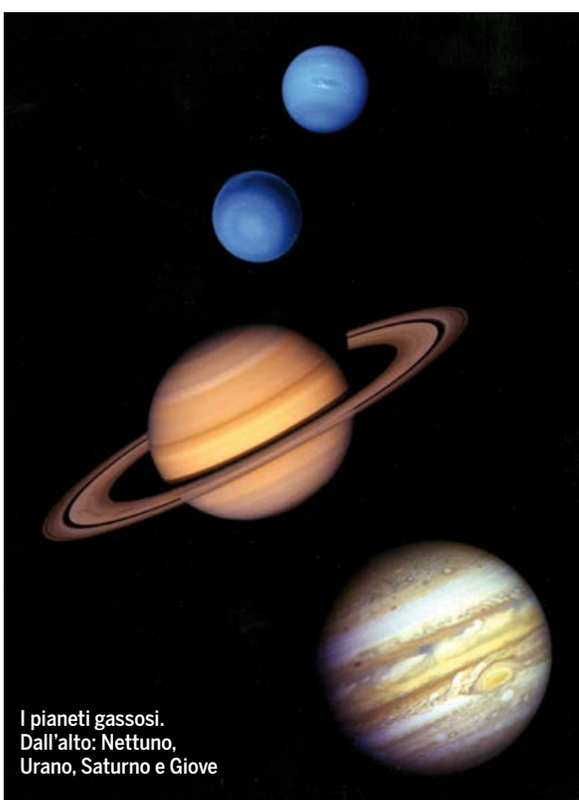


I pianeti rocciosi mostrati in scala. Da sinistra: Mercurio, Venere, Terra, Marte

ESA Max-Planck-Institute for Solar System Research/cometa di Halley, NASA JPL/pianeti

A sinistra, lo sciame delle Perseidi ripreso dal Parco nazionale del Joshua Tree, California

Qui sopra, la cometa di Halley ripresa nel 1986 durante il suo ultimo passaggio ravvicinato alla Terra



I pianeti gassosi. Dall'alto: Nettuno, Urano, Saturno e Giove

La raffigurazione del nostro Pianeta visto dal suolo lunare

Reuters/NASA

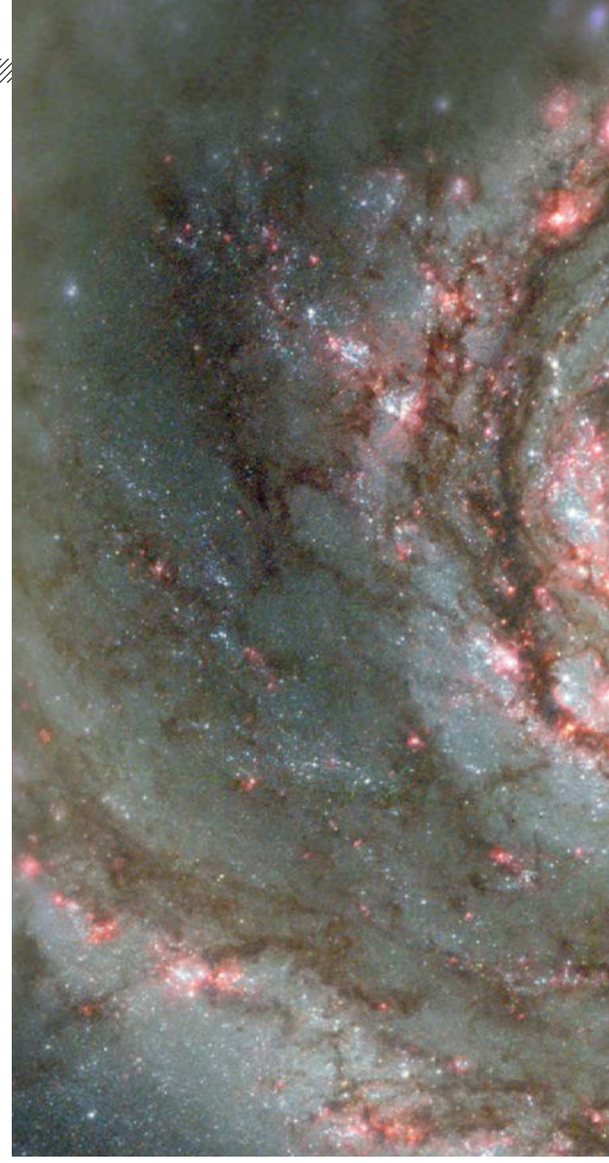
L'ORIGINE DEL SISTEMA TERRA-LUNA

L'origine del nostro pianeta e del suo satellite naturale è un argomento che affascina non solo gli appassionati di astronomia ma anche, da secoli, scrittori e poeti. Capire le dinamiche che hanno caratterizzato la formazione di questo sistema significa comprendere maggiormente la nostra collocazione nell'Universo

Gli astronomi ritengono che la Terra, assieme al Sole e a tutti gli altri pianeti del nostro sistema planetario, sia nata circa 4,6 miliardi di anni fa (come abbiamo appena detto nelle pagine precedenti). Il Sistema Solare sarebbe infatti il risultato della condensazione, lungo un braccio di spirale della nostra Galassia, di una grossa nube interstellare di gas e polveri, a loro volta prodotti dall'esplosione di una supernova e dalla conseguente dispersione nello spazio dei resti in espansione. Questa nube, in rotazione su se stessa, andò via via appiattendosi fino a formare un disco, al cui centro si trovava concentrata la maggior parte della materia. Dalla condensazione centrale sarebbe poi nato il Sole, mentre dal disco piatto di gas e polveri sarebbero nati i pianeti e tutti gli altri corpi del sistema planetario (satelliti, asteroidi, comete).

DAI PLANETESIMI AI PIANETI

Gli astronomi ipotizzano che il nostro pianeta si sia formato attraverso la progressiva aggregazione di corpuscoli, inizialmente di piccole dimensioni, costituiti essenzialmente da materiale metallico, rocce e ghiaccio. Da questi corpuscoli si formarono per accrescimento corpi sempre più grandi, fino a raggiungere diametri di qualche chilometro. Nel loro tragitto attorno al Sole, questi corpi, denominati planetesimi, continuarono poi a spazzare l'orbita aggregando i frammenti più piccoli e diventando pertanto sempre più grandi e massicci. Poi fu la volta dei planetesimi stessi a scontrarsi fra di loro, talvolta per rompersi nuovamente in corpi più piccoli, tal altra per dare origine a un unico corpo di dimensioni maggiori. Il risultato di questo processo è sotto gli occhi di tutti: al termine di questo lavoro di "pulizia orbitale", i planetesimi, seguendo orbite a varie distanze dal corpo centrale, che nel frattempo si stava accendendo per diventare la stella Sole, si erano aggregati per formare i pianeti, fra cui la Terra. Durante tutto il periodo della sua formazione, il nostro pianeta aumentò la propria temperatura interna, in parte a causa della trasformazione in calore dell'energia gravitazionale dei frammenti che si stavano aggregando, in parte a causa dell'energia emessa dagli elementi radioattivi presenti nella nebulosa primordiale. In conseguenza di questo aumento di temperatura si ebbe la fusione del materiale planetario e la successiva distribuzione a varie profondità, a seconda della densità del materiale stesso. Così, la parte più densa, formata in prevalenza da metalli come ferro e nichel, andò a costituire il nucleo metallico centrale; i materiali con densità intermedia, come il basalto, si disposero in uno strato soprastante, detto mantello; infine, i materiali meno densi, come i silicati, si distribuirono sulla superficie, per andare a formare, in seguito al successivo raffreddamento, la cosiddetta crosta.
Inizialmente, la massa allo stato fuso della Terra (che aveva una temperatura superficiale attorno a 800 °C) era avvolta da un'atmosfera essenzialmente formata dai gas provenienti dalla superficie. Successivamente la temperatura iniziò a diminuire piuttosto rapidamente, permettendo così alle prime rocce di solidificarsi e andare appunto a formare i primi tratti di crosta



CRONOLOGIA DEGLI IMPATTI CATASTROFICI SULLA TERRA

Illustrazione pittorica della collisione di un asteroide con la Terra

Don Davis NASA

Il rischio che il nostro pianeta corre di essere colpito da un asteroide di grosse dimensioni è attualmente molto limitato o, meglio, estremamente improbabile, ma nel Sistema Solare primordiale le collisioni fra corpi orbitanti erano praticamente all'ordine del giorno. Tutti i pianeti e i satelliti con crosta solida mostrano, seppure in diversa misura, prove tangibili di queste collisioni: le superfici completamente butterate di crateri (di dimensioni e profondità variabile) di pianeti come Mercurio o di satelliti come la Luna sono il risultato di un costante bombardamento meteorico che, in misura minore, è attivo ancora oggi.
Anche la Terra è bersaglio quotidiano di meteoriti, la maggior parte dei quali fortunatamente di dimensioni piccolissime, se non addirittura microscopiche, che ovviamente non lasciano alcuna traccia visibile (fra l'altro occorre tenere presente che il 70 per cento della superficie terrestre è coperto da acque). In tempi più o meno passati, però, il nostro pianeta è stato vittima di impatti catastrofici causati da meteoriti di grosse dimensioni, alcuni dei quali si suppone siano all'origine (o che abbiano funzionato da acceleratori) delle più importanti estinzioni di massa di esseri viventi ripetutamente verificatesi nel corso della sua evoluzione.
Dopo la "tempesta di asteroidi" di circa 4 miliardi di anni fa, un asteroide di grosse dimensioni (circa 10 km di diametro) ha colpito la Terra 250 milioni di anni fa, contribuendo con i suoi catastrofici effetti alla chiusura del

Le nubi interstellari che caratterizzano la nostra Galassia e che hanno dato origine al sistema Terra-Luna, sono presenti nei bracci di molte altre galassie, come la Galassia Vortice, che presenta regioni H II (idrogeno ionizzato) e intricate strutture di polveri

LA TERRA, COME GLI ALTRI PIANETI ROCCIOSI, OGNI GIORNO È COLPITA DA METEORITI DI PICCOLE DIMENSIONI

solida, sempre più spessa, fino alla nascita dei continenti. Nel frattempo, anche l'atmosfera primitiva veniva sostituita da una nuova coltre gassosa, la cui composizione chimica era prevalentemente costituita da metano, ammoniaca e vapor d'acqua. Fu proprio quest'ultimo che, condensando a causa del processo di raffreddamento del pianeta, produsse le abbondanti piogge che andarono infine a raccogliersi nelle concavità della crosta terrestre per dare origine agli oceani.

continua a pag **52**

Una desolata immagine di Tunguska, la località siberiana che, il 30 giugno 1908, venne colpita da un meteorite esploso a un'altezza di dieci chilometri dal suolo

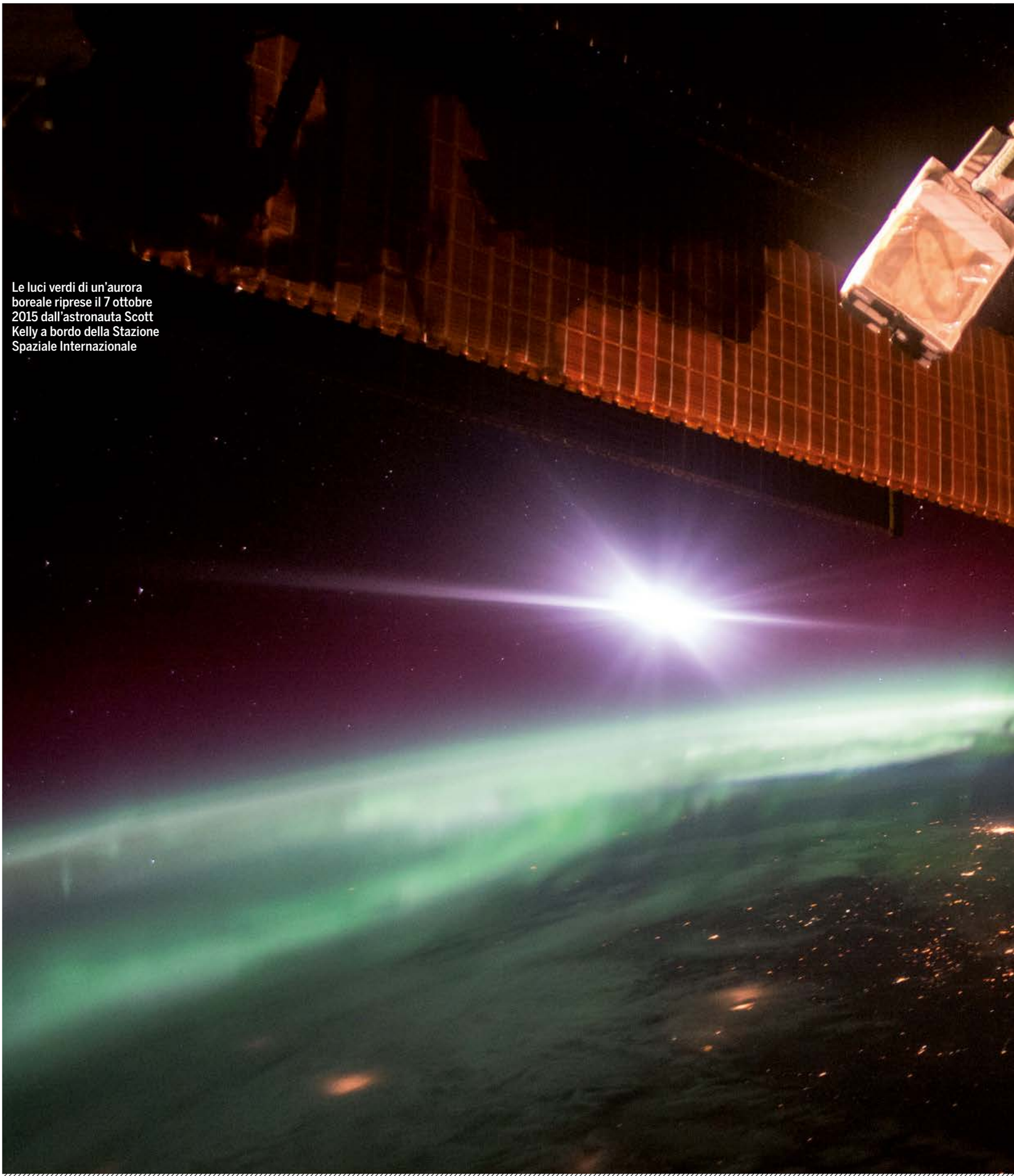
periodo geologico denominato Permiano con la più grave estinzione di forme viventi mai occorsa sul pianeta Terra. Anche l'altra grande estinzione di massa – quella corrispondente al passaggio fra i periodi Cretaceo e Terziario, particolarmente nota perché legata alla scomparsa dei dinosauri – è stata con ogni probabilità causata o comunque "aiutata" dall'impatto di un grosso meteorite, anch'esso del diametro stimato di qualche chilometro.

A parte questi eventi che hanno avuto effetto significativi su scala globale, molti altri ne sono avvenuti durante le diverse ere geologiche. A tutt'oggi sulla superficie terrestre sono stati identificati almeno 150 crateri da impatto, alcuni di dimensioni ragguardevoli (da qualche decina di chilometri fino a 300 km di diametro) rimasti visibili nonostante l'intensa e costante azione erosiva degli agenti esogeni ed endogeni.

L'evento significativo più recente risale al 1908, quando un corpo di dimensioni relativamente piccole (dell'ordine di qualche decina di metri) esplose in atmosfera a un'altitudine di dieci chilometri in prossimità della località siberiana di Tunguska. Duemila chilometri quadrati di foresta vennero abbattuti dall'intensa onda d'urto, ma non venne registrata alcuna perdita umana, a causa della bassissima densità di popolazione in quelle zone. L'energia rilasciata è stata stimata attorno a 10-100 megaton (un megaton sprigiona l'energia di un milione di tonnellate di tritolo), ovvero circa 1.000 volte quella delle bombe atomiche di Hiroshima e Nagasaki, che avevano una potenza attorno ai 20 kiloton. E si calcola che un evento di questo tipo abbia la probabilità di accadere una volta ogni cento anni!

Qualche ricercatore ha anche ipotizzato che alcuni episodi controversi della storia umana siano legati a impatti catastrofici. Fra questi il diluvio universale, la cui descrizione non appare soltanto nella Bibbia, ma anche nei testi sacri di molte altre culture. Tramandato da migliaia di anni, potrebbe in effetti essere stato causato proprio da un asteroide (o da una cometa) caduto nell'Oceano Indiano. Il maremoto risultante – con onde alte anche centinaia di metri – e gli effetti atmosferici associati avrebbero senz'altro avuto ripercussioni su tutte le terre emerse. Un'immane tragedia difficile da dimenticare e, anzi, da tramandare ai posteri come monito per le generazioni future.

HST-NASA/ESA/Galassia Vortice. Leonid Kulik Expedition. Wikipedia. Tunguska



Le luci verdi di un'aurora boreale riprese il 7 ottobre 2015 dall'astronauta Scott Kelly a bordo della Stazione Spaziale Internazionale

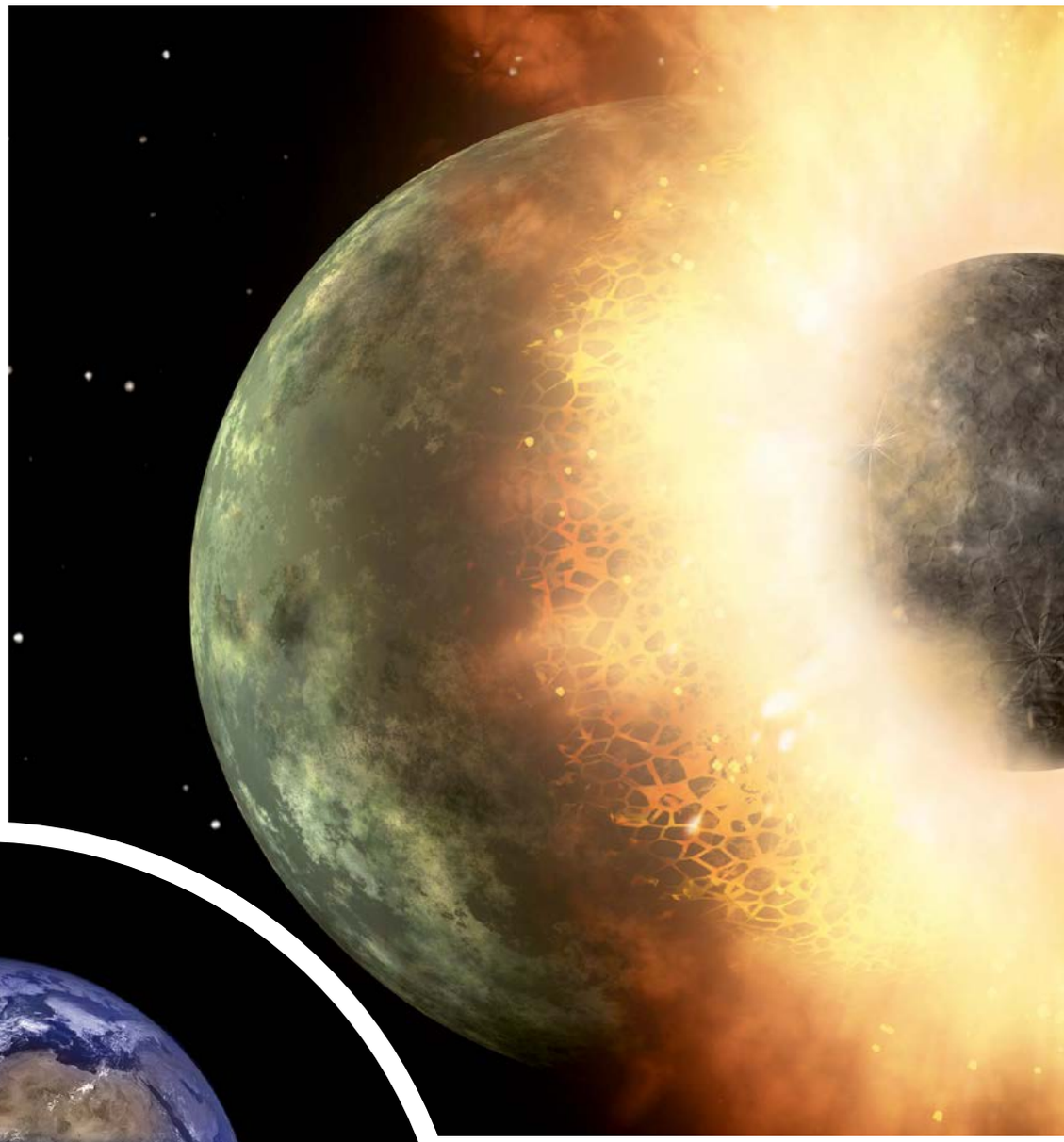
NASA

OLTRE CHE VISIONI EMOZIONANTI, L'INDAGINE DELLA TERRA DALLO SPAZIO OFFRE PROSPETTIVE UTILI ALLA SCIENZA

L'emisfero occidentale della Terra ripreso il 5 gennaio scorso da GEOS 16, un satellite meteo della NASA di nuova generazione, dotato di sofisticati strumenti che consentono di monitorare fenomeni atmosferici e offrire una previsione della loro evoluzione

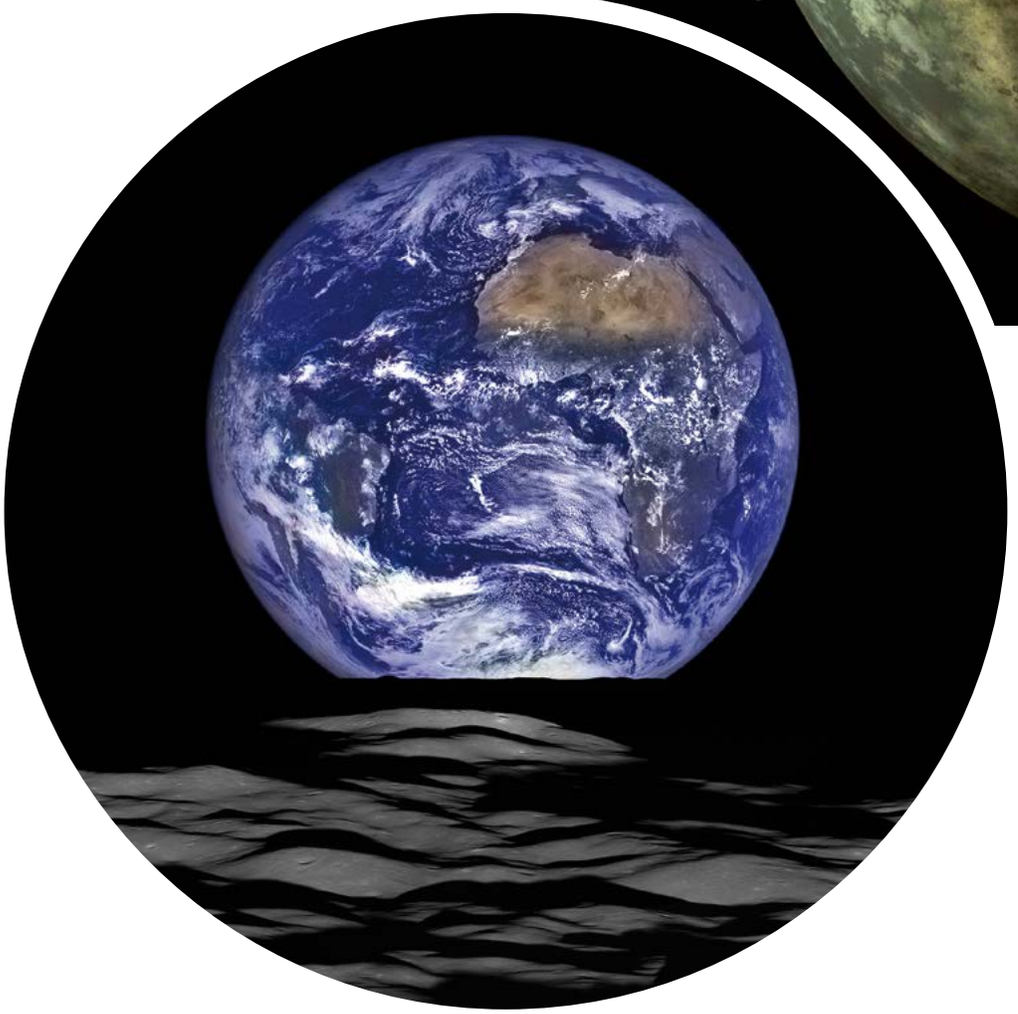
NOAA

SUI MECCANISMI DI FORMAZIONE DELLA LUNA ANCORA OGGI SI DISCUTE: TRE LE IPOTESI PIÙ ACCREDITATE



A lato, la formazione della Luna nello scenario che ipotizza sia nata come conseguenza di un impatto di un corpo planetario con la Terra

La Terra sale sull'orizzonte della Luna in una ripresa del Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)

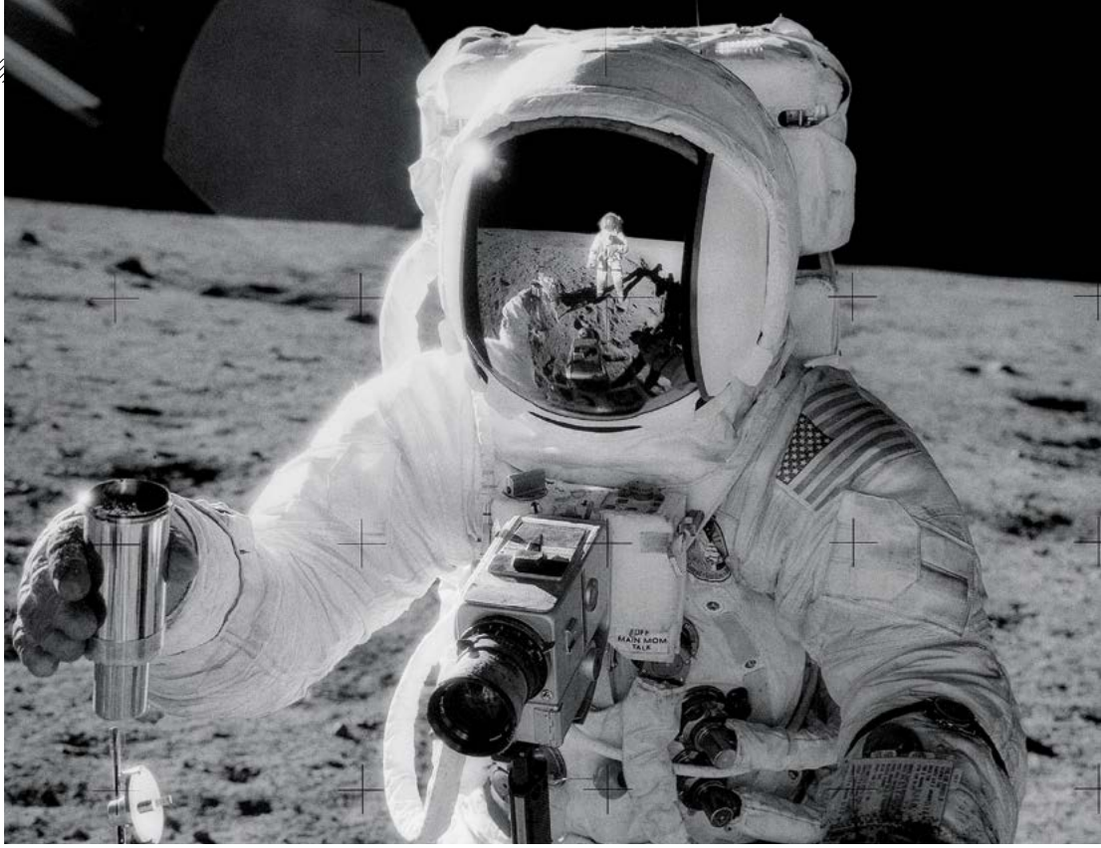


NASA/JPL-Caltech, impatto, NASA/Goddard/Arizona State Un., Terra-Luna

segue da pag **49**

L'ORIGINE DELLA LUNA

Se sull'origine della Terra gli scienziati hanno raggiunto una buona conoscenza, non altrettanto si può dire dell'origine della Luna, un satellite molto particolare rispetto a tutti gli altri satelliti principali che si osservano nel Sistema Solare. La sua singolarità è determinata dal fatto che è il più grande rispetto alle dimensioni del pianeta attorno a cui orbita (fatto da cui poi deriva l'importanza delle maree). Tutti gli altri satelliti sono molto piccoli rispetto ai loro pianeti.
Nel corso del tempo, sono state formulate diverse ipotesi sulla sua formazione, ma le tre principali sono le seguenti.
La prima ipotesi considera la Luna una



Una delle tante iconiche immagini delle missioni di esplorazione lunare. L'astronauta Alan Bean, nel corso della missione Apollo 12 (1969), mostra un apposito contenitore riempito di terreno lunare. Lo foto è stata realizzata dall'astronauta Pete Conrad, la cui immagine si riflette nella visiera di Bean

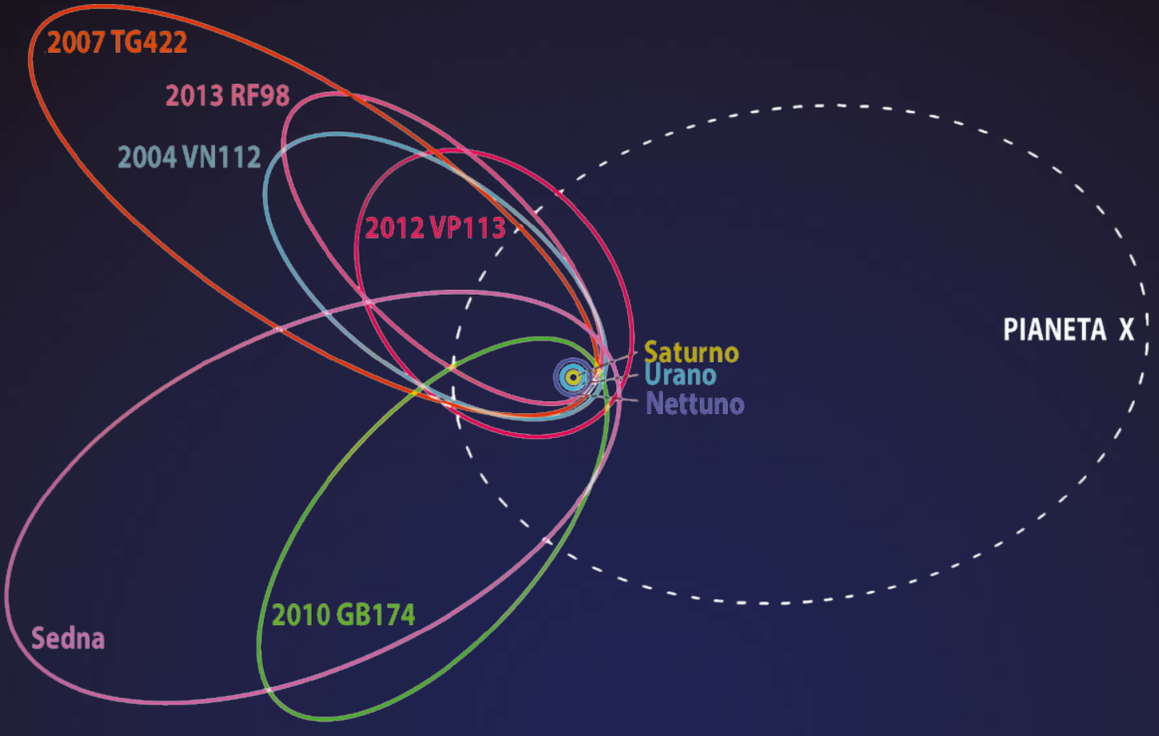
A lato, il più pesante (11 kg) campione di roccia lunare portato a terra dagli astronauti dell'Apollo 16

sorta di sorella minore della Terra: in pratica si sarebbero formate assieme, durante il processo di aggregazione di planetesimi. Alcuni avrebbero quindi dato origine alla Terra, altri, in orbita attorno al nostro pianeta, si sarebbero fusi per costituire la Luna. Ma c'è un problema: Terra e Luna non hanno la stessa composizione chimica (per esempio, la Terra è ricca di ferro, mentre la Luna ne ha poco), quindi difficilmente hanno avuto origine dallo stesso materiale.
Secondo altri la Luna sarebbe nata indipendentemente, in un'altra regione del Sistema Solare, e solo successivamente sarebbe stata catturata dalla Terra grazie alla sua attrazione gravitazionale. Tuttavia anche questa seconda ipotesi ha un punto debole: le lune catturate da altri pianeti (come per esempio Phobos e Deimos per Marte) hanno la tipica forma irregolare degli asteroidi, e spesso non orbitano nello stesso verso del pianeta, mentre invece la Luna ha una forma sferica regolare e orbita nello stesso verso del nostro pianeta.
La terza ipotesi, quella più incredibile, da un certo punto di vista, ma anche la più probabile, è quella dell'impatto cosmico. Secondo questa teoria, la Terra appena formata sarebbe stata colpita da un corpo planetario delle dimensioni di Marte, che nell'impatto si sarebbe totalmente disintegrato. Tuttavia, un pezzo consistente del nostro pianeta, fuso e vaporizzato, sarebbe andato a costituire un anello di materiale, anch'esso fuso, e di frammenti di rocce in orbita attorno alla Terra, da cui poi, in seguito ad aggregazione di questi frammenti e al loro successivo raffreddamento, si sarebbe formata la Luna. Questa teoria è in grado di spiegare molte delle peculiarità del sistema Terra-Luna, fra cui il dilemma della composizione delle rocce lunari, la cui composizione è molto simile a quella del mantello terrestre. I materiali strappati dall'impatto, finiti in orbita attorno alla Terra, sarebbero quindi provenienti dalla crosta e soprattutto dal mantello terrestre, da cui appunto si ipotizza sia scaturita la roccia fusa da cui ha avuto origine il nostro satellite. ■

NASA

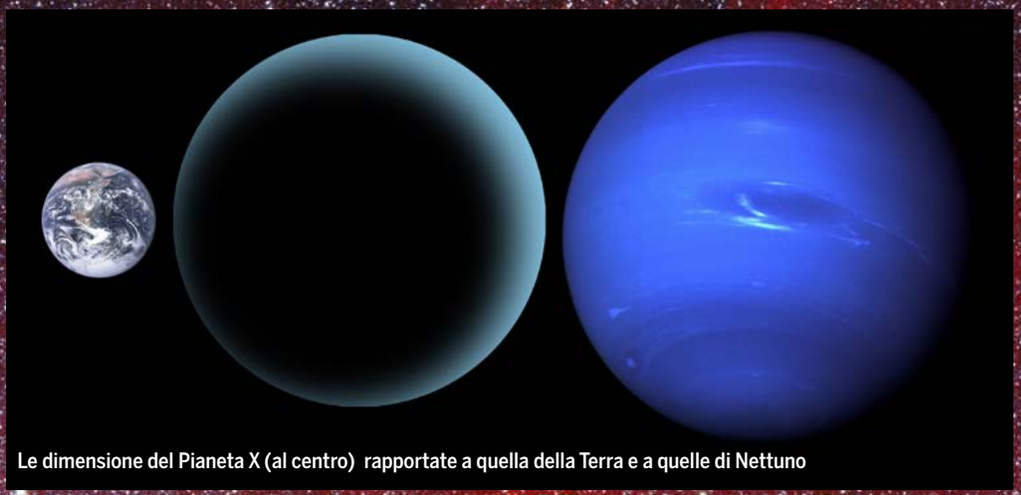
LA RICERCA DEL PIANETA X

Ancora non si ha la conferma visiva, ma l'esistenza di un pianeta ai margini del Sistema Solare è molto probabile. Le perturbazioni orbitali sui corpi oltre l'orbita di Nettuno sono un importante indizio della sua presenza



NASA/JPL-Caltech/S. Stolovy (SSC/Caltech)

Immaginando il pianeta X sullo sfondo di una ripresa del centro della Via Lattea realizzata dal telescopio Spitzer. L'orbita del misterioso pianeta viene messa a confronto con quelle di alcuni oggetti transnettuniani



Le dimensione del Pianeta X (al centro) rapportate a quella della Terra e a quelle di Nettuno

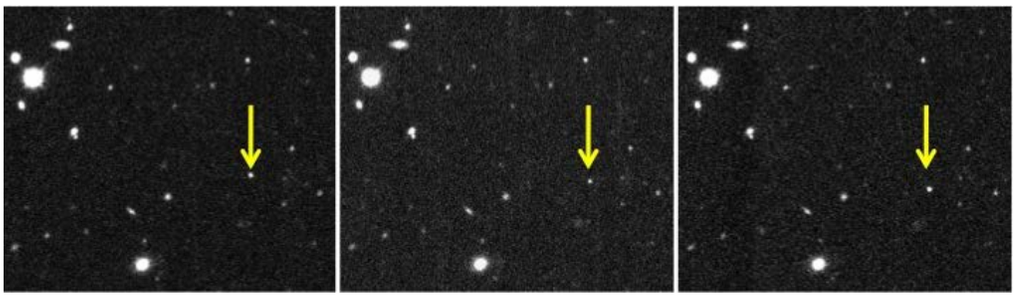
Dal 2006, anno in cui l'Unione Astronomica Internazionale (IAU) decise di introdurre una nuova classe, quella dei pianeta nano, sappiamo che il Sistema Solare conta, oltre a otto pianeti, anche un numero indefinito di questi oggetti. Per la verità, a oggi solo cinque rispettano i criteri imposti dall'IAU per essere definiti tali: fra questi trovano posto anche Plutone, che venne declassato proprio in quell'occasione (dal 1930, anno della sua scoperta, e fino a quel momento era invece stato considerato il nono pianeta del Sistema Solare), e l'asteroide della fascia principale Cerere, il primo asteroide a essere scoperto, a opera dell'astronomo italiano Giuseppe Piazzi (1746-1826) nel 1801. Cerere è anche il più grande degli asteroidi conosciuti, o almeno il maggiore fra quelli orbitanti nella fascia degli asteroidi compresa fra Marte e Giove.

L'ENIGMATICA NUBE DI OORT

Tuttavia la popolazione dei pianeti nani è destinata a crescere. In effetti, oltre ai tre oggetti transnettuniani riconosciuti come pianeti nani: Haumea, Makemake ed Eris (quest'ultimo acclamato dai "mass media" come "decimo pianeta" al momento della scoperta, avvenuta nel 2005), in lista di attesa ci sono già diversi corpi individuati oltre l'orbita di Nettuno, come Sedna e Quaoar, solo per citare i più famosi. È curioso osservare che, almeno fino a questo momento, a parte Cerere e Plutone, già noti, gli altri tre pianeti nani conosciuti sono stati tutti scoperti da un gruppo di astronomi composto da Michael Brown e Chadwick Trujillo, del California Institute of Technology (Caltech) di Pasadena, in California, e David Rabinowitz, della Yale University (New Haven, Connecticut). Brown, Trujillo e Rabinowitz sono anche fra gli astronomi maggiormente impegnati nella ricerca e nello studio di questi oggetti transnettuniani, fra i quali sperano appunto di trovare anche il vero "decimo pianeta" (che ora, dopo il declassamento di Plutone, possiamo tranquillamente chiamare Pianeta Nove, in attesa che venga effettivamente scoperto – sempre che esista realmente! – e che quindi gli venga attribuito un nome ufficiale). Fra gli oggetti individuati in questa zona oscura e lontana del Sistema Solare, quello che attualmente sembra orbitare alla maggiore distanza dal Sole è il planetoide 2012 VP113, scoperto grazie a osservazioni condotte con più telescopi e annunciato a fine marzo 2014 su "Nature" con un articolo dei suoi scopritori, Scott Sheppard, della Carnegie Institution for Science di Washington, e ancora Chadwick Trujillo, passato al Gemini Observatory, alle Hawaii. Oltre a essere

opera propria PlanetUser Commons

Il planetoide 2012 VP113 in tre riprese, realizzate con un intervallo di due ore circa. Dalla sequenza si coglie il suo movimento rispetto alle stelle di fondo



un possibile pianeta nano, infatti, 2012 VP113, detiene il nuovo record di distanza dal Sole, avendo superato quello di Sedna, il planetoide scoperto nel 2003. Il perielio (il punto di massimo avvicinamento al Sole) dell'orbita di 2012 VP113 si trova infatti a 80 unità astronomiche (UA), mentre quello di Sedna si ferma a 76 (l'unità astronomica è la distanza media Terra-Sole, pari a circa 150 milioni di chilometri). Questi due oggetti si trovano dunque a orbitare ben oltre la fascia di Kuiper (composta da migliaia di corpi ghiacciati), che si estende da 30 a 50 UA, in una zona all'estrema periferia del Sistema Solare che fino a poco tempo fa si riteneva vuota. Secondo nuove stime, invece, questa zona potrebbe contenere migliaia di oggetti, anche di dimensioni confrontabili con quelle della Terra, ma troppo distanti per essere scoperti con le tecnologie attuali. Si tratterebbe della regione più interna della nube di Oort, la cui origine è ancora oggetto di studio e dalla quale provengono alcune comete.

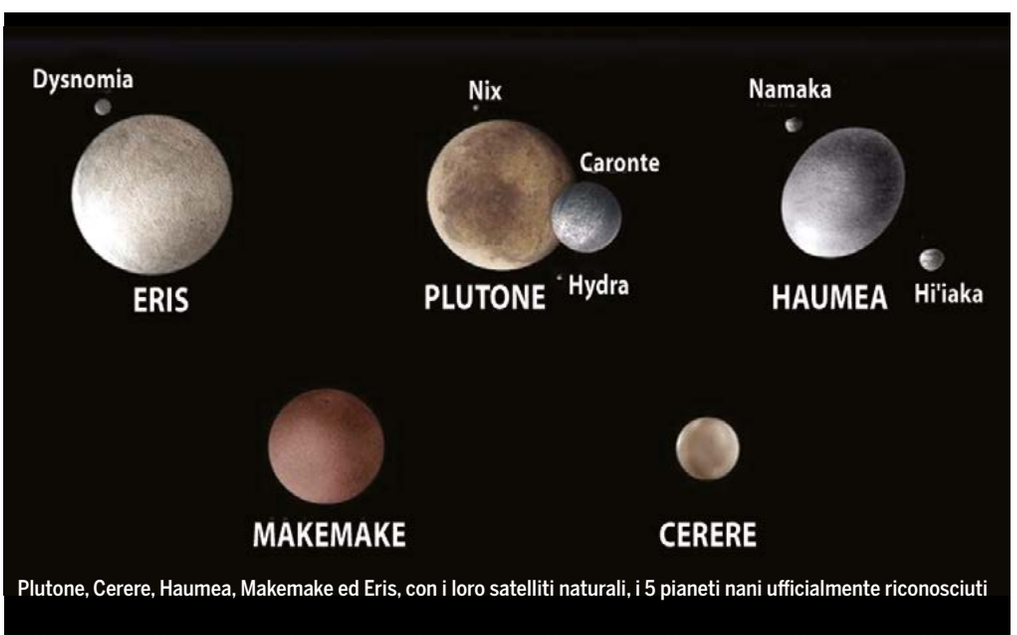
UNA QUESTIONE DI PERTURBAZIONI

Ora, la somiglianza fra le configurazioni orbitali di Sedna e 2012 VP113 fa sospettare che questi siano perturbati da un corpo distante, grande oltre 10 volte la Terra, ancora da scoprire. Secondo alcuni astronomi, potrebbe appunto essere il fantomatico Pianeta X, un pianeta al di là di Nettuno, la cui esistenza fu in origine ipotizzata proprio sulla base di apparenti discrepanze nell'orbita di Nettuno, che appunto subirebbe le perturbazioni gravitazionali di questo oggetto massiccio, ma ancora invisibile. In astronomia, infatti, una perturbazione sull'orbita di un pianeta o di un satellite la fa deviare dall'aspetto regolare di orbita ellittica. Le perturbazioni orbitali sono pertanto causate da altri corpi celesti (come gli altri pianeti) che esercitano un'attrazione gravitazionale sull'oggetto orbitante. Fu proprio studiando le perturbazioni orbitali su Urano che venne scoperto Nettuno, e la stessa esistenza di

Un ritratto di Costanzo Angelini dell'astronomo Giuseppe Piazzi (1746-1826), scopritore di Cerere, visibile sopra in un'immagine realizzata dalla sonda Dawn

Plutone venne prevista grazie all'analisi delle anomalie osservate nelle orbite di Urano e Nettuno.
Più recentemente, fra il 2015 e il 2016, ancora Michael Brown, assieme a Konstantin Batygin, sempre del California Institute of Technology, hanno sviluppato un modello teorico e delle simulazioni al computer che sembrano

PERTURBAZIONI ORBITALI DI PLANETOIDI FANNO PRESUMERE L'ESISTENZA DI UN PIANETA GRANDE 10 VOLTE LA TERRA

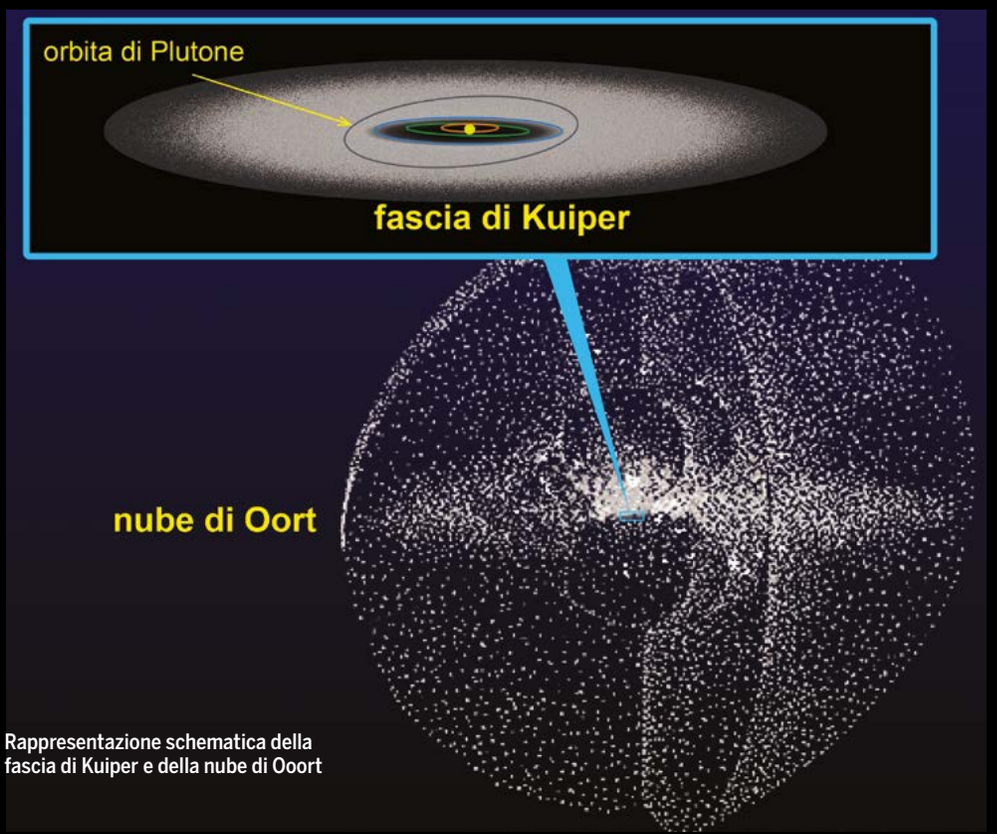


Plutone, Cerere, Haumea, Makemake ed Eris, con i loro satelliti naturali, i 5 pianeti nani ufficialmente riconosciuti

Scott Sheppard/Carnegie Institution for Science/ 2012 VP113, NASA, INAF

LA FASCIA DI KUIPER E LA NUBE DI OORT

La nube di Oort è una regione approssimativamente sferica del Sistema Solare, che si trova all'estrema periferia di questo, a partire da 20.000 unità astronomiche fino ad arrivare a 100.000 unità astronomiche dal Sole (come scritto nell'articolo, l'unità astronomica è un'unità di misura delle distanze, molto utile per descrivere le dimensioni del Sistema Solare, in quanto corrisponde alla distanza media Terra-Sole, pari a circa 150 milioni di chilometri). Questa nube, che prende il nome dall'astronomo olandese Jan Hendrik Oort (1900-1992), che per primo ne ipotizzò l'esistenza, è ritenuta come la zona da cui proviene la maggior parte delle comete a lungo periodo e con orbite molto inclinate rispetto al piano dell'eclittica, che è il piano dell'orbita terrestre (l'eclittica è il cammino apparente in cielo del Sole nell'arco di un anno e individua pertanto il piano su cui orbita il nostro pianeta).
La fascia di Kuiper è invece la regione esterna del Sistema Solare dove sono raccolte miriadi di frammenti planetisimali, asteroidi e nuclei di comete di varie dimensioni, anche confrontabili con le dimensioni degli asteroidi della fascia principale. A differenza delle orbite degli oggetti della nube di Oort, le orbite degli oggetti appartenenti alla fascia di Kuiper giacciono praticamente sul piano dell'eclittica. La fascia di Kuiper, che prende il nome dall'astronomo olandese Gerard Peter Kuiper (1905-1973), è un largo anello che si estende oltre l'orbita di Nettuno e rappresenta un'estensione interna ed appiattita proprio della nube di Oort. In pratica è costituita da piccoli corpi ghiacciati (essenzialmente composti da ghiaccio d'acqua e ammoniaca), con orbite prevalentemente comprese fra 30 e 50 Unità Astronomiche.
La fascia di Kuiper è la zona da cui proviene la maggior parte delle comete periodiche. Gli oggetti della fascia di Kuiper – denominati anche KBO, acronimo di Kuiper Belt Objects – rientrano nella categoria degli oggetti trans-nettuniani, alla quale appartengono anche tutti gli oggetti in risonanza orbitale con il pianeta Nettuno. In particolare, i corpi trans-nettuniani che compiono due rivoluzioni attorno al Sole nel tempo in cui Nettuno ne compie tre (risonanza orbitale 3:2) vengono chiamati plutini, perché anche Plutone è in risonanza 3:2 con Nettuno.

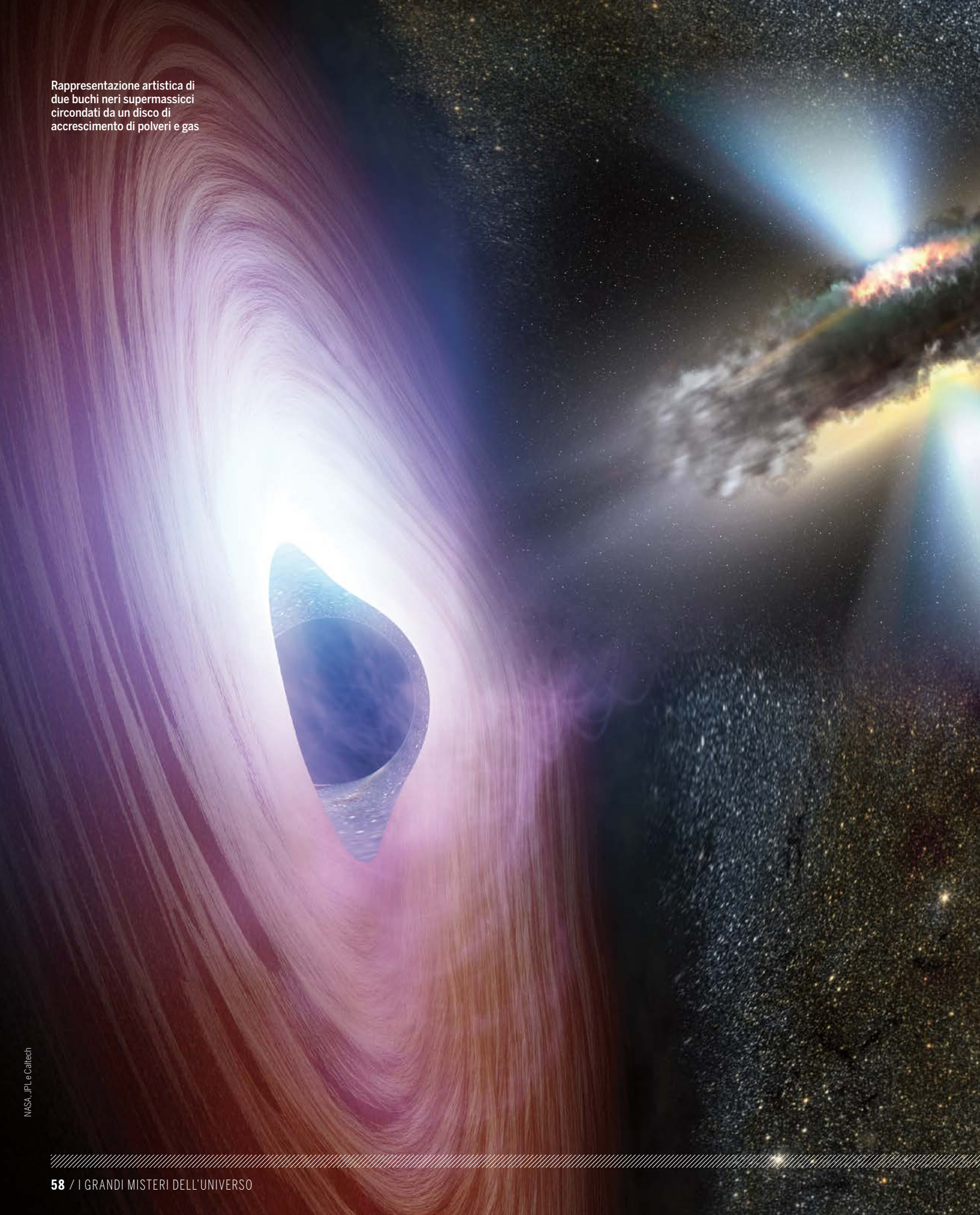


Rappresentazione schematica della fascia di Kuiper e della nube di Ooort

Da sinistra, Scott S. Sheppard, Chadwick Trujillo, Mike Brown e Konstantin Batygin

dimostrare l'esistenza di questo nuovo pianeta. Secondo i loro calcoli, infatti, le orbite dei corpi transnettuniani presentano caratteristiche tali da essere giustificabili solo con la presenza perturbatrice del Pianeta X, o Pianeta Nove, come appunto lo hanno battezzato loro. Le orbite di questi oggetti tendono infatti a raggrupparsi piuttosto che distribuirsi e orientarsi liberamente attorno al Sole. Il pianeta che sfugge ancora alla nostra "vista" dovrebbe avere dimensioni simili a quelle di Nettuno, ma orbitare attorno al Sole a una distanza media dalla nostra stella circa 20 volte maggiore di quella di Nettuno, impiegando per completare un'orbita attorno a esso un tempo compreso fra 10.000 e 20.000 anni terrestri. Insomma, questo oggetto deve ancora essere scoperto e gli astronomi già sanno praticamente tutto di lui, tranne dove trovarlo. Intanto si continuano a scoprire pianeti nani, planetoidi, plutini, oggetti della fascia di Kuiper e altro ancora, per rendere la famiglia del Sistema Solare sempre più ricca e varia. E chissà che prima o poi non spunti fuori davvero un nuovo pianeta. Lo scetticismo di molti astronomi incombe sui calcoli di Batygin e Brown, ma loro non hanno dubbi: l'estrema periferia del Sistema Solare continuerà a riservare sorprese. Allora non resta che attendere. ■

NASA, Carnegie Science DTM , Okio99 Commins



Rappresentazione artistica di due buchi neri supermassicci circondati da un disco di accrescimento di polveri e gas

NASA, JPL e Caltech

L'ENIGMA IRRISOLTO DEI BUCHI NERI

Misteriosi, inquietanti, affascinanti, questi oggetti rimangono ancora oggi tra i più problematici dell'Universo. Veri e propri "signori dell'oscurità", catturano qualunque atomo passi nelle loro vicinanze, imprigionando persino la luce

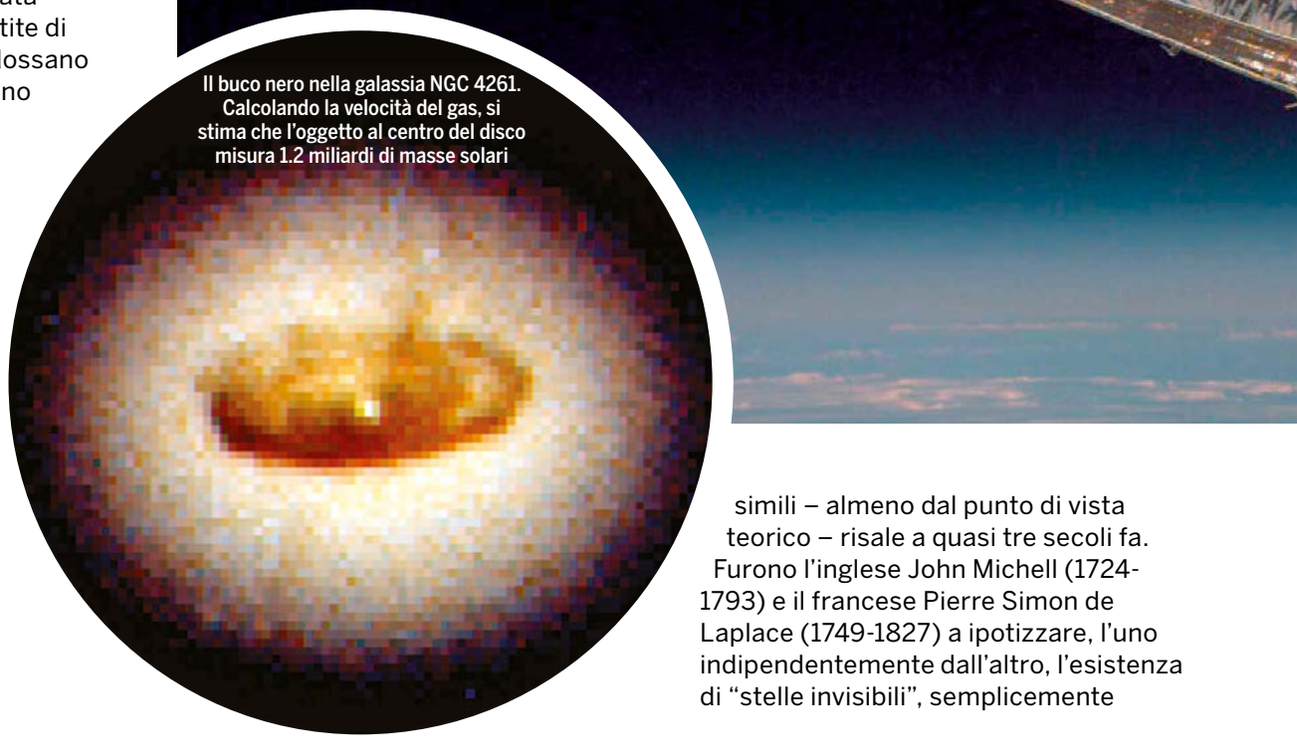
I buchi neri costituiscono un problema aperto sia per i fisici, che ancora non sono in grado di comprendere che cosa accade alla materia una volta risucchiata dentro essi, sia per gli astronomi che, non avendo la possibilità di osservare i fenomeni più energetici del cosmo, possono spiegare il loro comportamento solo in base alle reazioni delle stelle e delle galassie che entrano in rapporto con essi.
Cerchiamo dunque di capire qualcosa di più di questi affascinanti oggetti celesti, andando a vedere quanto è stato scoperto sinora grazie agli studi teorici e alle osservazioni dallo spazio, e quanto ancora resta da svelare del mistero che li avvolge.

CHE COS'È UN BUCO NERO

Il nome "buco nero" (in inglese "black hole") fu coniato nel 1967 dall'astrofisico teorico statunitense John Archibald Wheeler (1911-2008) per riferirsi a un corpo celeste la cui gravità era così intensa da non consentire neppure l'emissione della luce.
Ecco allora il motivo di tanto mistero: i buchi neri non sono luminosi, non possiamo vederli mai direttamente e siamo costretti a cercarli e studiarli solo attraverso gli indizi indiretti che la loro presenza lascia nell'ambiente circostante. In altre parole, se un buco nero mangia una stella, noi non "vediamo" il buco nero, ma possiamo osservare comunque gli effetti devastanti del suo intenso campo gravitazionale.

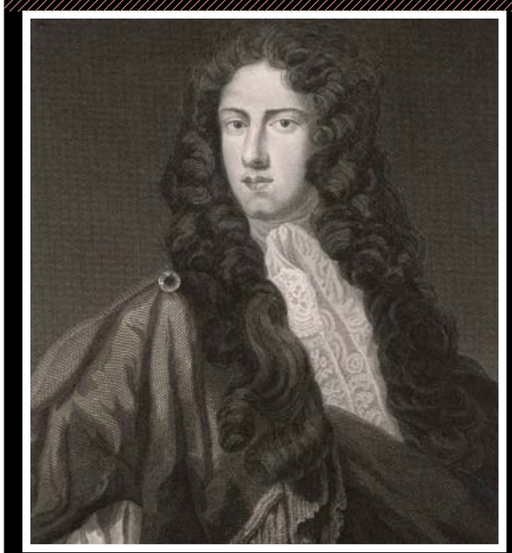
ESA, V. Beckmann, NASA GSFC

Proprio per questa loro caratteristica fondamentale, non avremo mai alcuna possibilità di individuare un buco nero isolato nello spazio. Sono solo gli effetti sulle stelle e sulla materia che lo circondano a fornirci indizi sull'eventuale presenza di uno di questi oggetti.
Per spiegare questo concetto, John Wheeler propose una curiosa analogia. Supponiamo di trovarci in una sala da ballo scarsamente illuminata dove le donne sono tutte vestite di bianco, mentre gli uomini indossano abiti scuri. Le prime resteranno comunque visibili, i secondi saranno, invece, delle ombre impercettibili. Così, guardando le coppie ballare, vedremo le donne muoversi in una coreografia che ci lascerà con facilità intuire anche la presenza dei partner maschili, seppure invisibili al nostro sguardo.
Nonostante sia stato Wheeler a coniare l'espressione "buco nero" riferendosi al possibile stadio finale di una stella collassata su se stessa sotto l'effetto della gravità, l'idea che potessero esistere corpi simili – almeno dal punto di vista teorico – risale a quasi tre secoli fa. Furono l'inglese John Michell (1724-1793) e il francese Pierre Simon de Laplace (1749-1827) a ipotizzare, l'uno indipendentemente dall'altro, l'esistenza di "stelle invisibili", semplicemente



Il buco nero nella galassia NGC 4261. Calcolando la velocità del gas, si stima che l'oggetto al centro del disco misura 1.2 miliardi di masse solari

I PIONIERI DEI BUCHI NERI



John Michell (1724-1793) ipotizzò l'esistenza di oggetti dotati di una massa così elevata da essere in grado di trattenere la loro stessa luce e risultare perciò invisibili

Pierre-Simon-Laplace (1749-1827) fu tra i primi studiosi a ipotizzare l'esistenza di corpi celesti invisibili e molto grandi

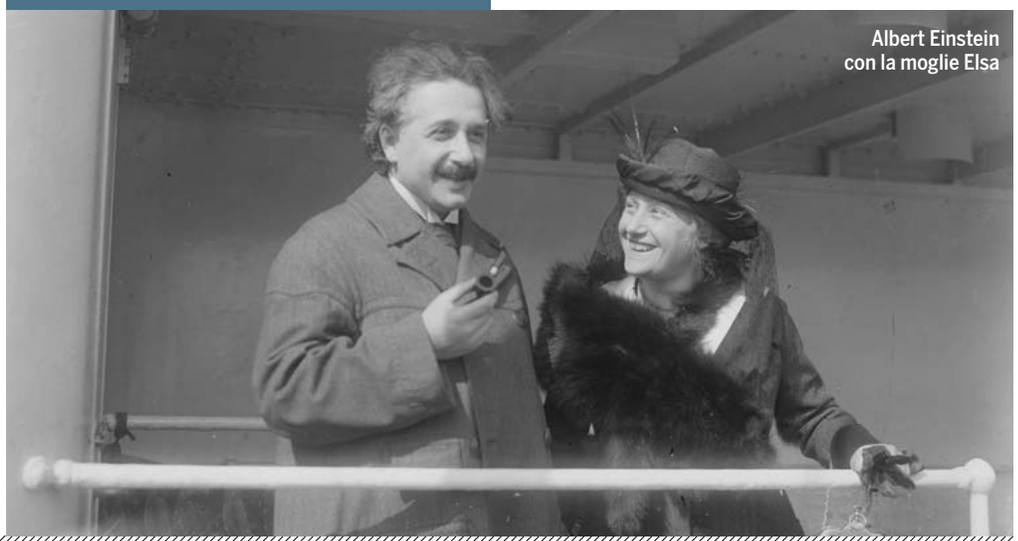
L'astrofisico statunitense John Archibald Wheeler, qui ripreso in una foto del 1985. Fu lui, nel 1967, a coniare il termine "black hole"

L. Ferrarese, Johns Hopkins University e NASA (buco nero), Mary Evans/AGF (Michell), Commons (Laplace), Emielke CC BY-SA 3.0 (Wheeler)

Il Telescopio Spaziale Hubble (HST), ha al suo attivo una serie di importanti risultati che hanno consentito e consentono numerosi progressi nello studio dei buchi neri

usando le leggi della dinamica e la legge di gravitazione universale di Newton (adesso i buchi neri sono correttamente descritti utilizzando la teoria della relatività generale di Albert Einstein). Nell'opera "Esposizione del sistema del mondo" (pubblicata nel 1798), Laplace scrisse: "Una stella luminosa, della stessa densità della Terra, e con un diametro pari a 250 volte quello del Sole, non permetterebbe, a causa della sua attrazione gravitazionale, ai suoi raggi luminosi di raggiungerci; è dunque possibile che i corpi celesti più grandi e più luminosi siano, per questo motivo, invisibili".
Il concetto che sta alla base dell'idea di Laplace è quello di velocità di fuga. Un buco nero, infatti, è un oggetto talmente compatto, che la sua gravità è in grado di trattenere anche la luce, che viaggia alla massima velocità possibile (pari a circa 300.000 km/s). In pratica, per fuggire dal buco nero occorrerebbe una velocità superiore a quella della luce, ma ciò è impossibile!
Per uscire da un campo gravitazionale, ovvero dalla zona d'influenza gravitazionale di un certo corpo, occorre infatti avere una velocità minima, altrimenti qualsiasi tentativo è destinato a fallire. Tale velocità prende il nome di "velocità di fuga" ed è appunto la minima velocità necessaria a un corpo per sottrarsi all'azione attrattiva di una sorgente gravitazionale, di qualunque tipo essa sia: pianeta, stella o galassia.
La velocità di fuga dalla Terra è pari a circa 11,2 chilometri al secondo: questo significa che i razzi lanciati dalla superficie terrestre, per uscire dal campo gravitazionale del nostro pianeta, devono assumere questa velocità, trascurando la resistenza dell'aria (nella realtà, si staccano da terra a velocità minore per arrivare a una certa quota, dove la velocità di fuga, essendo più lontana la sorgente gravitazionale, è conseguentemente minore ed è quindi possibile raggiungerla con una spinta propulsiva più bassa).
Per capire meglio di che cosa si tratta, facciamo un esempio. Quando lanciamo un sasso verso l'alto, questo, a causa della forza di gravità, rallenta sempre di più fino a raggiungere un'altezza massima e poi ricade a terra. Lanciandolo con una forza maggiore, il sasso raggiungerà un'altezza maggiore della precedente, ma invertirà comunque il suo moto. Solo imprimendogli una certa velocità limite, saremmo in grado di farlo sfuggire definitivamente dal campo gravitazionale della Terra. La velocità di fuga dipende dalla massa e dalle dimensioni dell'astro da cui si vuole sfuggire. Se per la Terra, come detto, la stima è di 11,2 km/s, per il Sole è pari a 618 km/s. Per le nane bianche, di massa simile al Sole, ma molto più piccole

INDIVIDUARE BUCHI NERI È POSSIBILE SOLO ESAMINANDO GLI EFFETTI SU CIÒ CHE LI CIRCONDA



Albert Einstein con la moglie Elsa

NASA (HST), Library of Congress (Einstein)

L'INTENSA GRAVITÀ DI UN BUCO NERO TRATTIENE ANCHE LA LUCE. DA QUI IL TERMINE CON CUI VIENE CHIAMATO

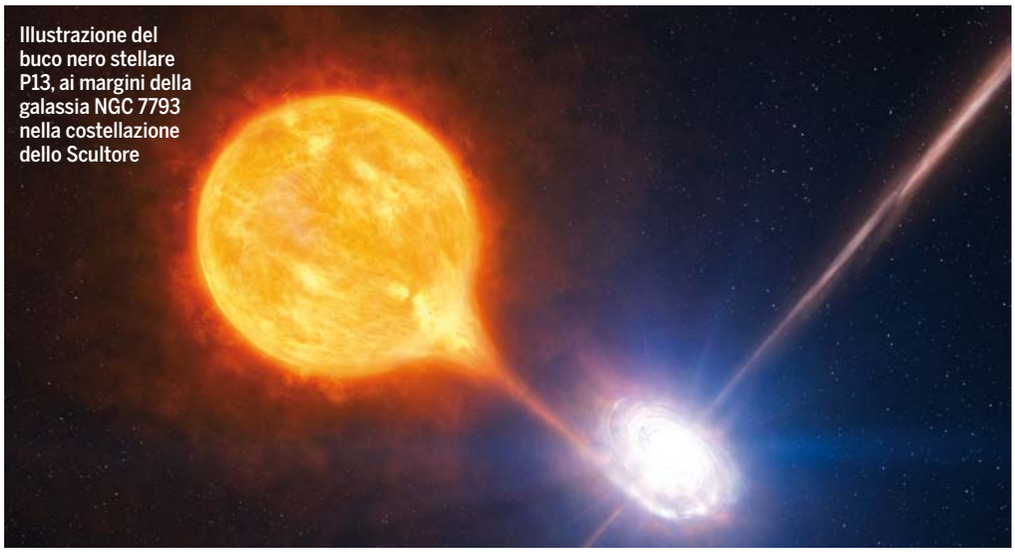
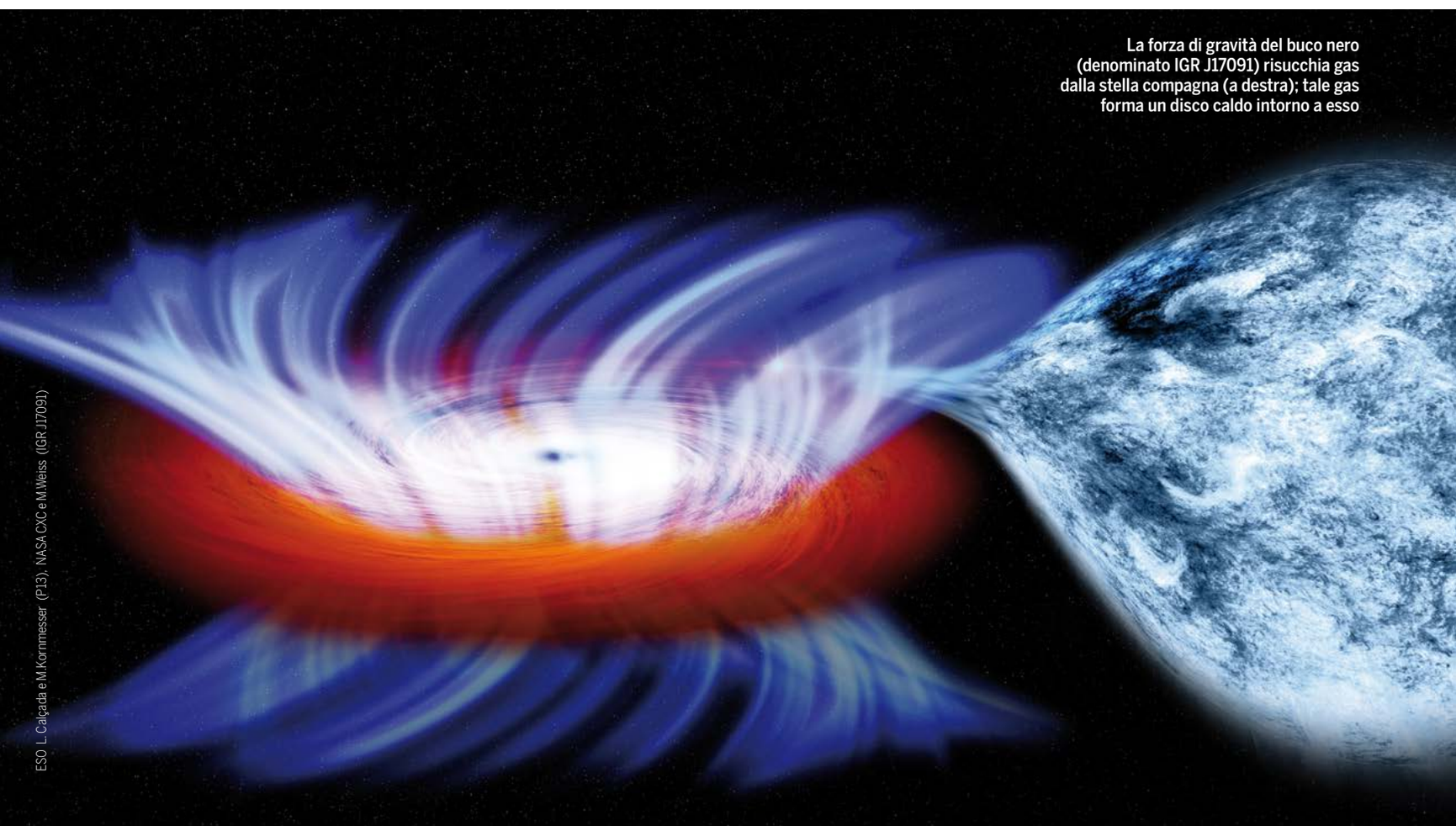


Illustrazione del buco nero stellare P13, ai margini della galassia NGC 7793 nella costellazione dello Scultore

(hanno diametri di poche decina di migliaia di chilometri), le velocità di fuga è di circa 7000 km/s, per le stelle di neutroni, con masse non molto superiori e dimensioni pari a quelle di una grande metropoli, arriva a 150.000 km/s.
Un corpo animato da una velocità pari alla velocità di fuga può dunque allontanarsi indefinitamente senza fare mai più ritorno alla sorgente gravitazionale. Ora, poiché come scritto poco sopra la velocità massima raggiungibile in natura è la velocità della luce, se la velocità di fuga da un corpo supera tale valore, nemmeno la luce può più sfuggire alla gravità di tale corpo: pertanto, in questo caso ci troviamo in presenza di un buco nero, che deriva appunto il nome da questa sua proprietà caratteristica.
È chiaro che un astro del genere cessa di essere visibile, perché nemmeno la luce riesce a sfuggire dalla sua intensa gravità. Fu Albert Einstein a spiegare



La forza di gravità del buco nero (denominato IGR J17091) risucchia gas dalla stella compagna (a destra); tale gas forma un disco caldo intorno a esso

ESO, L. Calçada e M.Kornmesser (P13); NASA CXC e M.Weiss (IGR J17091)

CYGNUS X-1: IL PRIMO CANDIDATO

Illustrazione del sistema Cygnus X-1, formato da una stella binaria e da un candidato buco nero

La nostra Galassia non è immune dalla presenza di potenziali candidati a buco nero. Fortunatamente nessuno di questi è così vicino a noi da rappresentare una minaccia per la sopravvivenza della Terra o del Sistema Solare. Nonostante l'elevato numero di sorgenti di raggi X compatte osservate (le aspiranti migliori per ospitare un buco nero), non esiste infatti ancora alcuna certezza su nessun candidato. Fra questi, l'unico che ancora resiste strenuamente a ogni possibile altra interpretazione delle osservazioni è il sistema binario compatto noto come Cygnus X-1, ovvero la sorgente X più luminosa della costellazione del Cigno.
Questo sistema, con un periodo orbitale di circa cinque giorni e mezzo, è composto da una stella blu molto calda e di grosse dimensioni e da una secondaria invisibile la cui massa stimata è di circa 15 masse solari. Posta a una distanza di 6100 anni luce, se la secondaria fosse una stella normale, sarebbe anch'essa facilmente visibile. La sua invisibilità, l'intensa emissione X prodotta dal sistema e, infine, la stima della massa fanno pensare alla maggioranza degli astronomi di essere davanti al primo caso accertato di buco nero stellare. Ma c'è ancora qualche scettico: fra questi troviamo anche l'inglese Stephen Hawking, uno dei maggiori studiosi di buchi neri e autore, nel 1975, di una curiosa scommessa con il collega statunitense Kip Thorne, che invece era già all'epoca un forte sostenitore della candidatura di Cygnus X-1 a buco nero stellare.
Anni dopo Hawking ha dichiarato di aver perso la scommessa (regalando così un abbonamento annuale alla celebre rivista erotica "Penthouse", che era il premio pattuito, a Thorne). Nonostante questo, ancora oggi – per il celebre scienziato – la natura di Cygnus X-1 resta incerta.

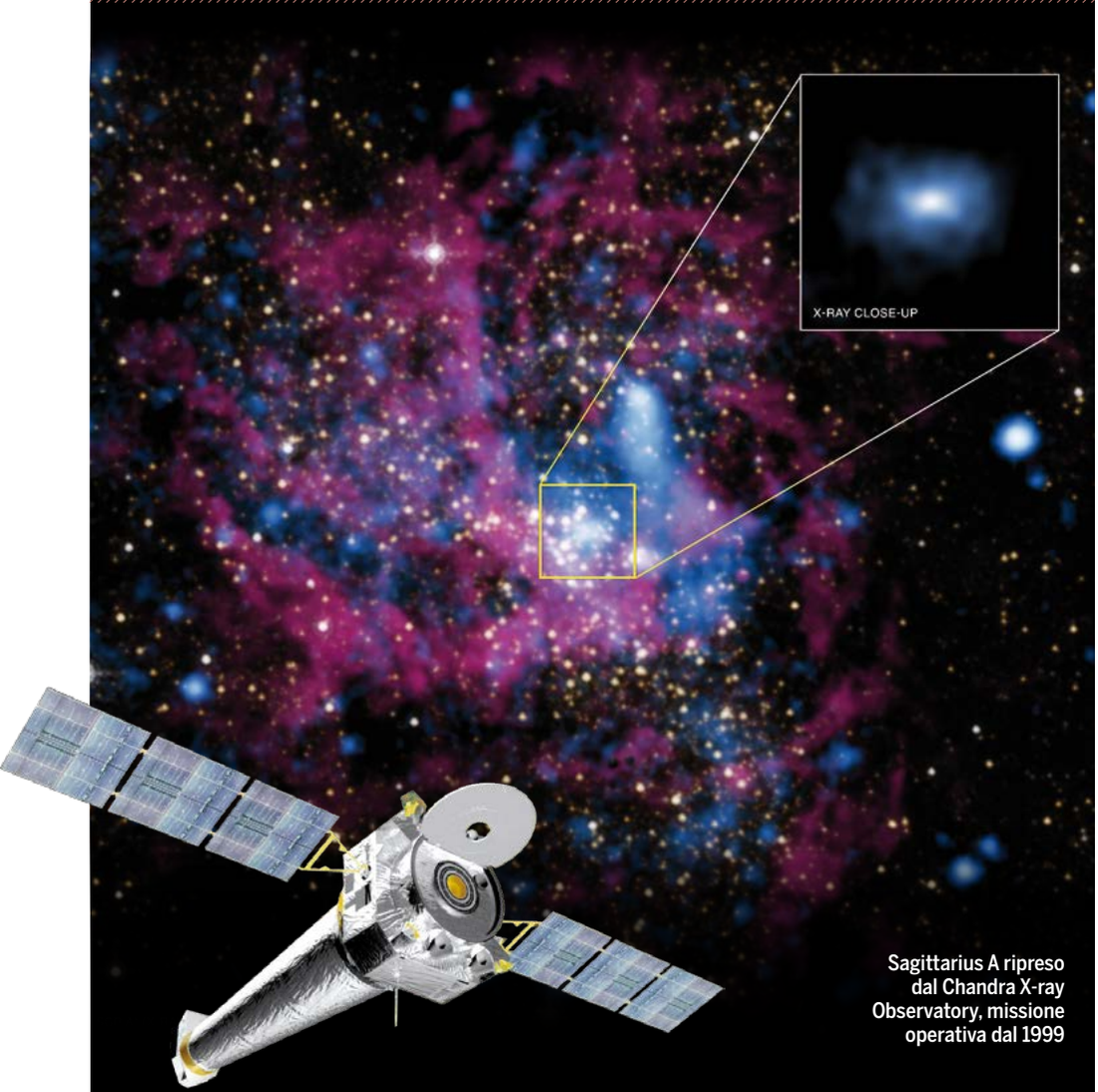
questo fatto in termini di deflessione della luce da parte di un campo gravitazionale. In pratica, nelle vicinanze di un buco nero, lo spazio-tempo è così incurvato che anche le traiettorie dei raggi luminosi si ripiegano su loro stesse senza via di scampo. A titolo di esempio, per trasformare il Sole in un buco nero dovremmo concentrare tutta la sua massa in una sfera di circa 3 km di raggio, mentre la Terra si trasformerebbe in un buco nero solo a patto di diventare una pallina con una raggio di appena 9 mm!

I DUE, TRE... O QUATTRO TIPI DI BUCO NERO

Fino a circa venti anni fa le osservazioni davano conto di due soli tipi di buchi neri: quello stellare, e quello supermassiccio. Da un decennio a questa parte, grazie alle immagini e agli spettri ad alta risoluzione di satelliti per raggi X come "Chandra" e XMM-Newton, ha fatto la sua apparizione sulla scena un terzo tipo: il buco nero di massa intermedia, con masse tipiche di migliaia di volte quella del Sole.
Esiste poi l'ipotesi avanzata da Stephen Hawking, che ha teorizzato l'esistenza di un quarto tipo di buco nero, quello mini, con masse molto piccole, che possono arrivare ad appena un miliardo di tonnellate (cioè circa la massa di una grande montagna). Ma andiamo con ordine.
I buchi neri stellari, i primi a essere stati individuati, hanno origine quando una stella di grande massa, al termine della sua evoluzione, esaurisce tutto il suo combustibile nucleare e collassa su se stessa sotto l'effetto della propria gravità: un'esplosione

ESA e NASA

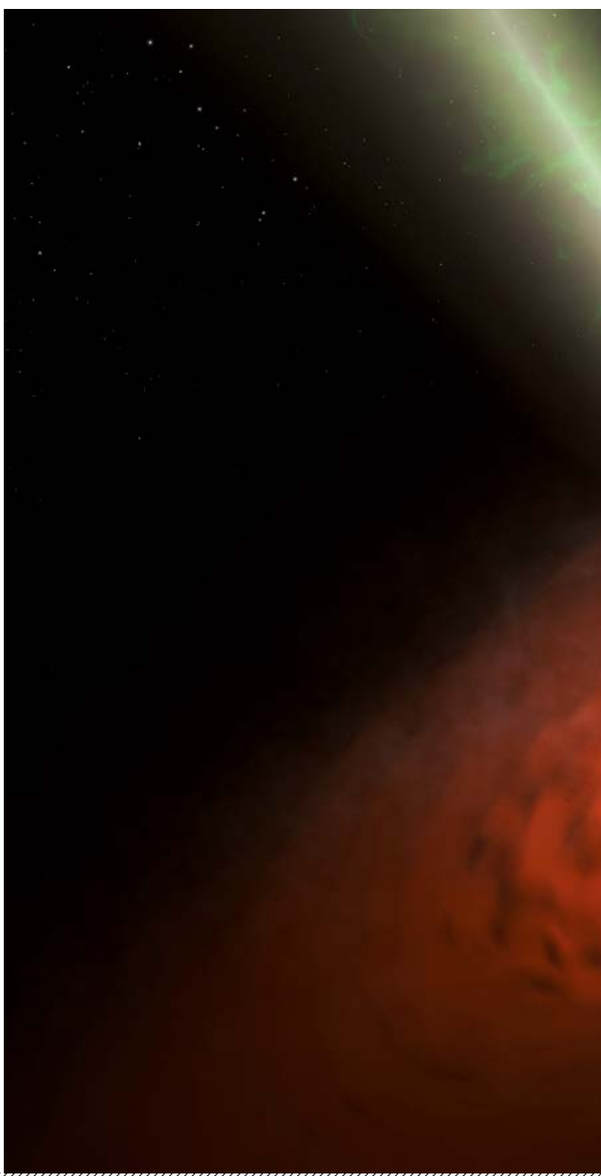
SAGITTARIUS A, IL BUCO NERO SUPERMASSICCIO DELLA NOSTRA GALASSIA



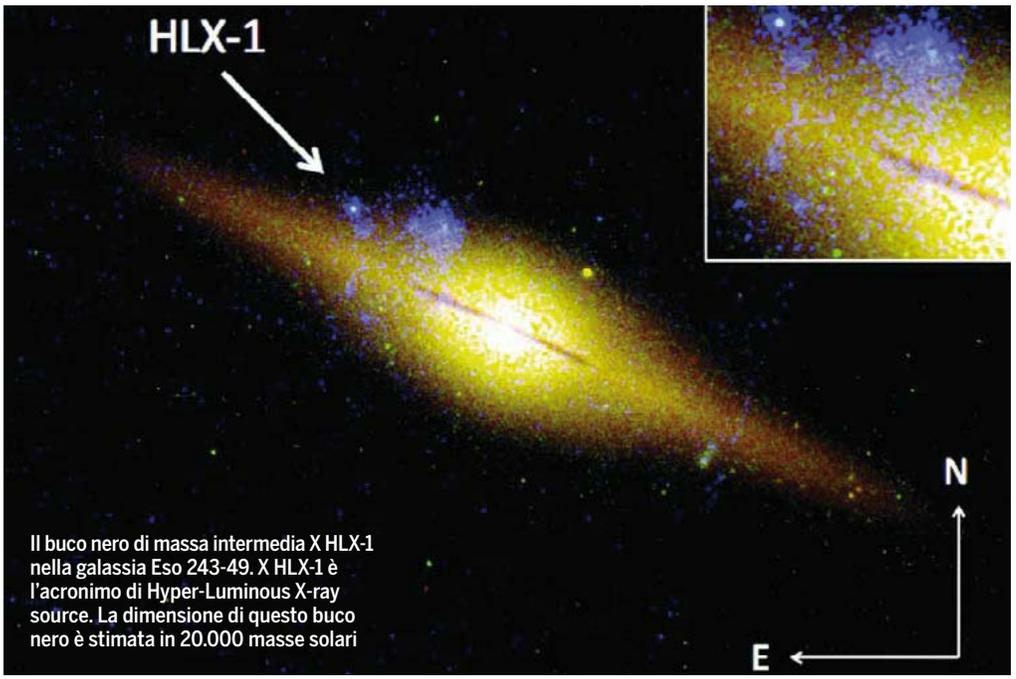
Sagittarius A ripreso dal Chandra X-ray Observatory, missione operativa dal 1999

Se gli astronomi hanno ancora molti dubbi sul fatto che nella nostra Galassia si siano già individuati dei buchi neri stellari, come quello appartenente al sistema binario Cygnus X-1, meno dubbi sembrano esserci nei riguardi dei buchi neri supermassicci, di cui anche la nostra Galassia è dotata. La sorgente, nota con il nome di Sagittarius A, è localizzata esattamente al centro del piano della Via Lattea. Il nome le deriva dal fatto di essere la sorgente radio più intensa della costellazione del Sagittario. Proprio in quella direzione si trova sia il centro geometrico che quello fisico del nostro sistema galattico. Distante da noi circa 26.000 anni luce (il Sistema Solare si trova in una posizione abbastanza periferica della Galassia, il cui diametro complessivo si aggira sui 100.000 anni luce), il buco nero supermassiccio associato alla radiosorgente Sagittarius A ha una massa stimata di circa 4 milioni di masse solari, confinata in una sfera avente un raggio di poco superiore a 20 milioni di chilometri (per confronto, la distanza media Terra-Sole è circa 150 milioni di chilometri). Rivelatosi anche un'intensa sorgente di raggi X – ma non così intensa come quelle osservate nei nuclei galattici attivi –, per la sua relativa vicinanza (è sicuramente il buco nero supermassiccio più vicino alla Terra), in questi ultimi anni è stato particolarmente studiato dall'osservatorio orbitante della NASA "Chandra".
Sagittarius A è forse il residuo "dormiente" di quello che forse è stato, milioni o miliardi di anni fa, un buco nero attivo.

disintegra l'astro - il fenomeno noto come supernova - in uno scenario catastrofico. Se il nucleo della stella supera la decina di masse solari, nessuna forza nucleare è in grado di contrastare il collasso gravitazionale e il risultato finale è un buco nero.
I buchi neri stellari sono caratterizzati da masse confrontabili con quella del Sole o non molto superiori, probabilmente fino a qualche decina di masse solari.
A fornirci informazioni importanti in tal senso sono le recenti osservazioni dirette di onde gravitazionali emesse al momento della fusione di coppie di buchi neri appartenenti a sistemi binari. Nei tre casi attualmente confermati di rilevazione di onde gravitazionali, i buchi neri avevano tutti masse di alcune decine di masse



NASA UMASS D. Wang et al. STScI



Il buco nero di massa intermedia X HLX-1 nella galassia Eso 243-49. X HLX-1 è l'acronimo di Hyper-Luminous X-ray source. La dimensione di questo buco nero è stimata in 20.000 masse solari

VERI E PROPRI "MOSTRI", I BUCHI NERI SUPERMASSICCI SONO GLI OGGETTI PIÙ ENERGETICI DELL'UNIVERSO

Una suggestiva illustrazione di un buco nero supermassiccio circondato da un disco di accrescimento molto brillante composto da materiale caldissimo e da un anello di polvere. Spesso dal buco nero esplodono getti di materiale che viaggia nello spazio a velocità simile a quella della luce

solari. Tuttavia c'è anche chi ipotizza che questi ultimi possano avere avuto origini diverse: potrebbero infatti essersi generati come conseguenza di processi di accrescimento di buchi neri di massa minore o potrebbero essere il frutto di precedenti fusioni, per esempio all'interno di ammassi stellari particolarmente densi.

I buchi neri supermassicci (anche detti supermassivi) sono, invece, caratterizzati da masse che vanno da qualche centinaio di migliaia a molti milioni di masse solari.

Individuati per la prima volta nei nuclei attivi di alcune galassie, diverse sono le ipotesi avanzate sulla loro formazione: dal buco nero stellare che in milioni di anni mangia tutte le stelle che lo circondano, all'ammasso di buchi neri che si fondono insieme a, infine, un'enorme nube di gas che collassa direttamente in un buco nero supermassiccio.

I buchi neri supermassicci si trovano al centro di moltissime galassie, se non di tutte. Anche la nostra ne ha uno, Sagittarius A.

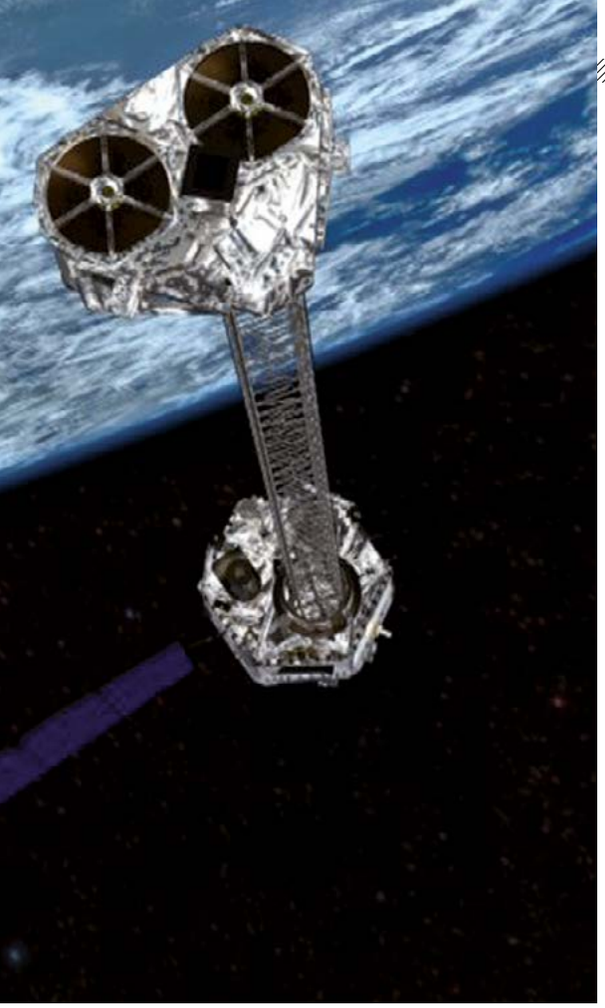
Le galassie con il buco nero centrale ancora avvolto da una grande quantità di materiale in caduta e quindi in grado di produrre grandissime quantità di energia sono dette attive, e i loro nuclei sono appunto detti nuclei galattici attivi. I quasar, per esempio, ovvero gli oggetti più distanti del cosmo che

Mnras, M. Mapelli et al. (X HLX-1), ESO L. Calçada

noi siamo in grado di osservare, sono galassie attive in cui solo il nucleo, brillantissimo, è visibile da miliardi di anni-luce di distanza.
All'origine delle incredibili luminosità dei nuclei galattici attivi ci sono le altissime temperature raggiunte dal gas in caduta a spirale verso il buco nero supermassiccio.
La materia forma un disco di accrescimento o, meglio, una ciambella ("toro") che avvolge il "mostro". Il gas, riscaldato a milioni di gradi, emette radiazione praticamente a tutte le lunghezze d'onda, dalle onde radio ai raggi X. L'accrescimento di materia è una fonte molto efficiente di energia: ne produce a un tasso 10 volte superiore a quello in funzione nelle stelle (reazioni nucleari).
Ancora un mistero restano invece i buchi neri di massa intermedia (compresa fra 100 e un milione di masse solari), della cui esistenza non si hanno prove definitive.
Secondo alcuni ricercatori i candidati favoriti all'inserimento in questa categoria si trovano nei nuclei di galassie attive di bassa luminosità, mentre altri studiosi dichiarano di averli individuati al centro di alcuni ammassi globulari particolarmente densi (gli ammassi globulari sono ammassi stellari di forma sostanzialmente sferica, da cui il nome, che possono contenere da centinaia di migliaia a milioni di stelle).
Su questo tipo di oggetti incombe però ancora lo scetticismo di molti astronomi, anche se alcune recenti ricerche fanno addirittura ipotizzare la presenza di buchi neri di taglia intermedia anche in prossimità del centro della nostra Galassia.
I buchi neri mini teorizzati da Stephen Hawking dovrebbero essere oggetti primordiali, ovvero nati nei primi istanti di vita dell'Universo, quando la pressione era intensissima e la densità della materia e dell'energia elevatissima. Di questi oggetti, però, non si è ancora trovato alcun riscontro.
Tuttavia, alcuni modelli di Universo prevedono che nelle fasi iniziali

Un buco nero supermassiccio con raggi X emanati dalla sua regione interna (in rosa) e dai venti ultravioletti (linee violacee) che scorrono dal disco dal quale è circondato

ESA e NASA



Lanciato nel 2012, il Nustar (Nuclear Spectroscopic Telescope Array) è un potente telescopio spaziale della NASA dedicato all'indagine nei raggi X. In particolare NUSTAR ricerca buchi neri supermassicci

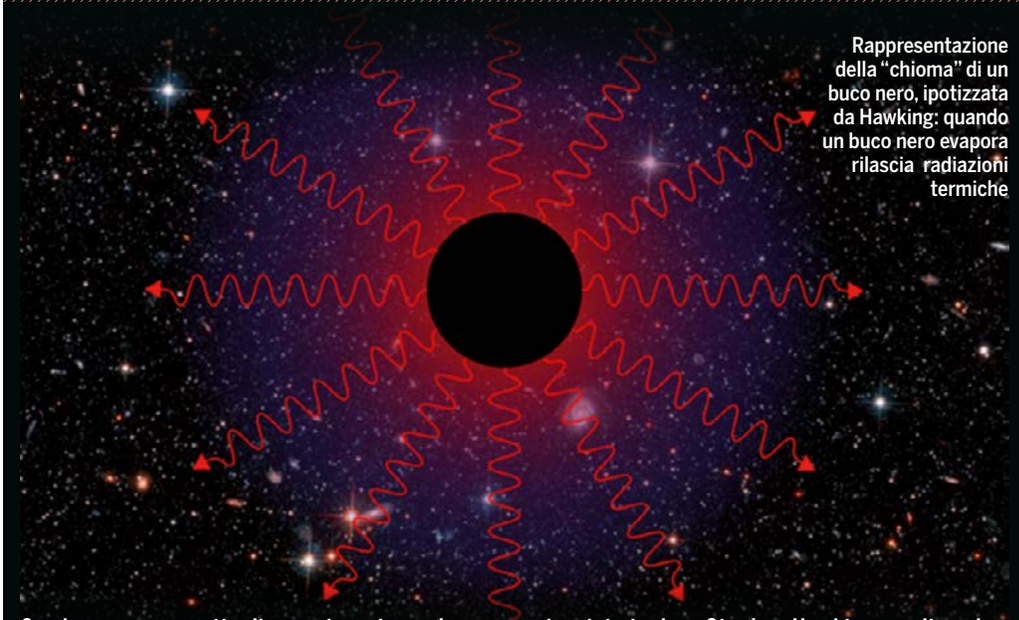
dell'espansione, proprio in virtù delle particolari condizioni di pressione e densità, possano essersi formati non solo mini buchi neri, ma anche buchi neri di masse più elevate, da qualche decina di masse solari fino a quelle tipiche dei buchi neri di massa intermedia (giustificando così anche l'esistenza di questa classe di buchi neri intermedi). La ricerca di buchi neri primordiali è un importante filone di indagine in cosmologia, anche perché questi oggetti sono potenziali candidati a rivestire, almeno in parte, il ruolo di materia oscura.

COME SI INDIVIDUA UN BUCO NERO

Gli astrofisici sono riusciti ad "accendere una luce" sui buchi neri da non molti anni. Grazie a strumenti e tecniche sempre più sofisticate da terra e dallo spazio i buchi neri ora sono meno misteriosi, o almeno è meno misterioso l'ambiente che li circonda. Come abbiamo detto, un buco nero, infatti, non è visibile direttamente, e l'unico modo per individuarne uno, di qualunque tipo, è che sia circondato da una sufficiente quantità di materia (stelle e gas caldo) che gli orbita attorno a distanza ravvicinata.
Per i buchi neri stellari, ad esempio, significa osservare il moto orbitale di una stella attorno a una compagna invisibile in un sistema binario. I sistemi binari compatti - composti da due astri molto vicini fra loro di cui uno è invisibile - sono in effetti un obiettivo privilegiato degli astrofisici in cerca di buchi neri. L'indizio della presenza di un buco nero (o di una stella di neutroni) è la forte emissione nei raggi X. Il motivo è il seguente. Il buco nero, con la sua intensa attrazione gravitazionale, può strappare materia dalla stella compagna. Questo gas si dispone su un disco appiattito, cadendo a spirale verso il buco

GRAZIE AI POTENTI STRUMENTI OGGI A DISPOSIZIONE, SONO STATI POSSIBILI NOTEVOLI PROGRESSI NELLA COMPRENSIONE DEI BUCHI NERI

L'EVAPORAZIONE DEI BUCHI NERI

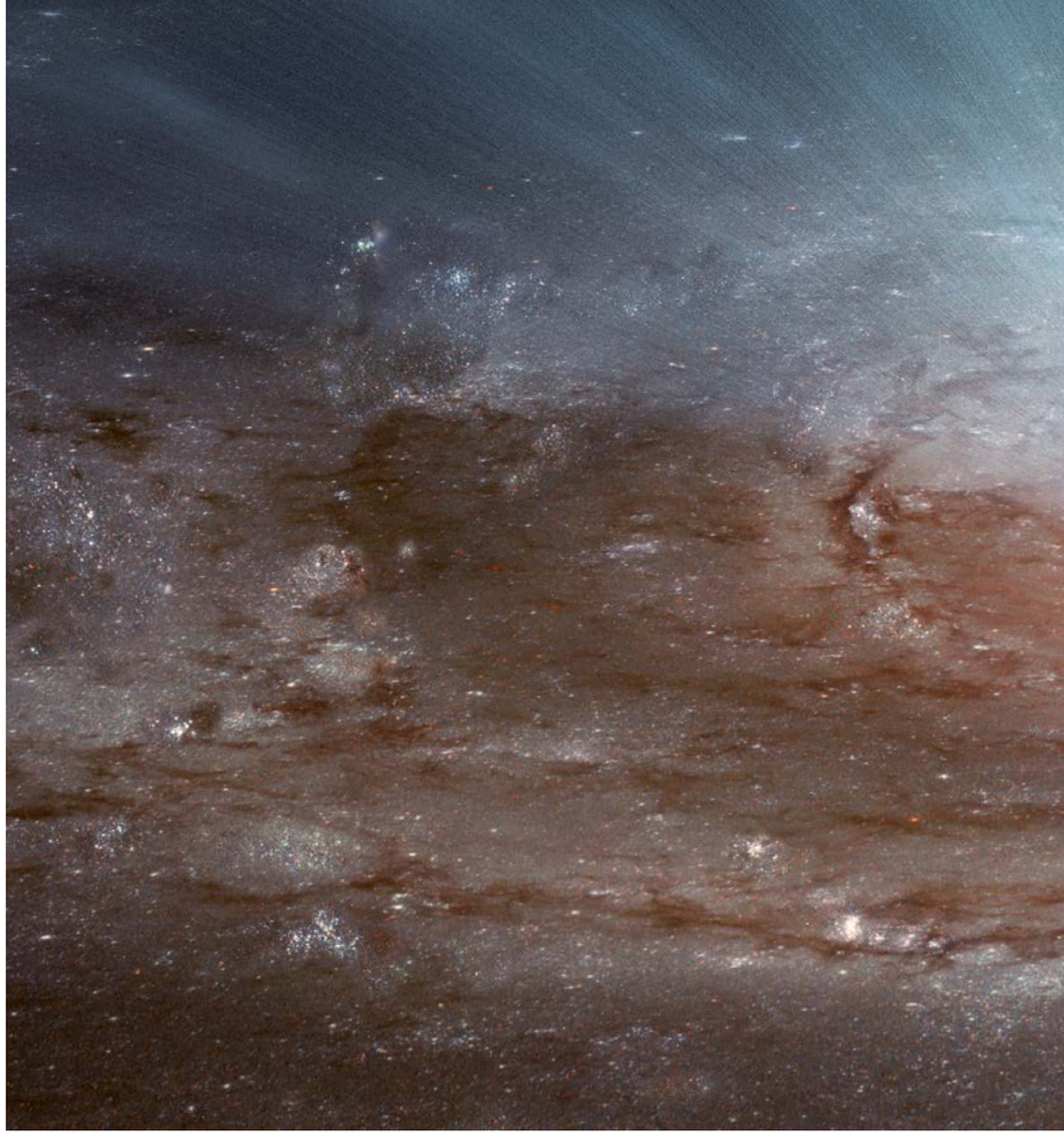


Rappresentazione della "chioma" di un buco nero, ipotizzata da Hawking: quando un buco nero evapora rilascia radiazioni termiche

Con le conoscenze attuali, non siamo in grado di sapere cosa accada realmente alla materia e all'energia che cadono all'interno dei buchi neri. In fondo, però, una sorta di lieto fine può esistere anche in questo scenario catastrofico: sì, perché i buchi neri, anche se molto lentamente, "evaporano". Ovvero, riemettono tutta la materia e l'energia da cui sono composti. In altre parole, non sono così neri come li dipinge la relatività generale.
A dimostrarlo fu, negli anni Settanta, lo scienziato inglese Stephen Hawking, applicando le leggi della meccanica quantistica. Prima o poi, la materia caduta nei buchi neri uscirà nuovamente fuori sotto forma di "radiazione di Hawking", come appunto è stata chiamata – in onore dello scopritore - l'emissione di particelle da parte del buco nero. Basterà attendere qualche migliaio di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di anni! (Per confronto, l'età del nostro Universo è di poco più di 10 miliardi di anni).

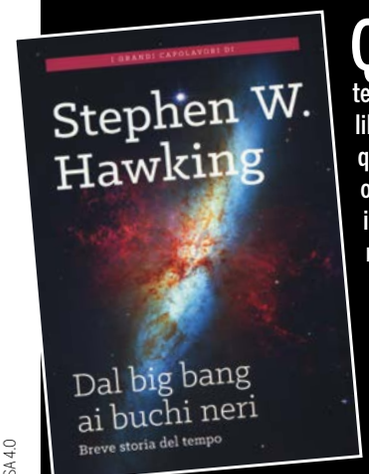
American Physical Society Alan Stonebrake

L'INDAGINE NEI RAGGI X HA CONSENTITO DI INDIVIDUARE DIVERSI BUCHI NERI



nero. È l'attrito prodotto dalle collisioni fra le particelle del gas in caduta a riscaldare gli strati più interni del disco fino a temperature di alcuni milioni di gradi, producendo l'intensa emissione di raggi X.
Grazie alle osservazioni nella banda X, svolte dai ricercatori nel corso di molti decenni, sia nella nostra Galassia sia in alcune galassie vicine, sono state scoperte diverse sorgenti binarie compatte, fra cui una decina di sistemi contenenti potenziali candidati a buco nero. Il problema più grande per sciogliere il nodo è, infatti, quello di determinare la massa dell'astro invisibile. Questa, anche se con grande

I "RIPENSAMENTI" DI HAWKING



La copertina di uno dei più famosi libri di divulgazione di Stephen Hawking

Quella sulla natura di Cygnus X-1 non è l'unica scommessa di Hawking. Dopo decenni di studi teorici sui buchi neri, Hawking, famoso anche per i suoi libri divulgativi sull'argomento, ha infatti scoperto che quello che aveva sempre pensato su questi misteriosi oggetti non era vero. In particolare, Hawking aveva ipotizzato che la materia, una volta caduta nel buco nero, sarebbe scomparsa per sempre, e con essa tutto il suo contenuto di informazione. Era così certo di questo che nel 1997 ci scommise sopra con il collega statunitense John Preskill.
Il 21 luglio 2004, però,intervenendo a Dublino a un congresso sulla relatività, Hawking ha dato ragione a Preskill (inviandogli l'enciclopedia promessa).
I buchi neri non fanno proprio sparire tutto, anzi, hanno una sorta di "memoria". Al loro interno, infatti, potrebbero ancora conservare tracce di ciò che hanno ingoiato. Cosicché, "evaporando" (ovvero emettendo lentamente radiazione per effetto quantistico), restituirebbero questa informazione al nostro Universo. Nonostante la fama di Stephen Hawking, c'è, però, ancora molto scetticismo su questo argomento.

David M. Carroll (Opera propria) CC BY-SA 4.0

Sullo sfondo, un buco nero supermassiccio che emette venti veloci verso l'esterno. Isaac Newton (1642-1727) e Richard Bentley (1662 -1742) disquisirono sulla gravitazione

approssimazione, è determinabile studiando il moto della compagna o, con ancora maggiore complessità e problematicità, misurando la luminosità X della materia in caduta, legata da una relazione alla massa del corpo su cui cade.
Discorso analogo vale per i buchi neri supermassicci osservati nei nuclei di molte galassie e le cui masse vengono stimate misurando le velocità orbitali dei gas in caduta nel "mostro". In questo caso sono proprio le osservazioni svolte in banda radio e nell'ottico a mostrare ripidi aumenti di velocità delle nubi di gas orbitanti al centro delle galassie. La spiegazione è che queste alte velocità orbitali vengono causate dall'intenso campo gravitazionale di un oggetto massiccio. L'osservazione in banda X serve poi a confermare l'elevata produzione di energia causata dalla materia in caduta verso il buco nero.

Fu l'italiano Riccardo Giacconi ad avviare, all'inizio degli anni Sessanta, le ricerche nell'astronomia X, lavorando però negli Stati Uniti. Il premio Nobel assegnatogli nel 2002 è il riconoscimento per i suoi "contributi pionieristici all'astrofisica, che hanno portato alla scoperta delle sorgenti X nel cosmo".

PERCHÉ L'UNIVERSO NON È RISUCCHIATO DAI BUCHI NERI?

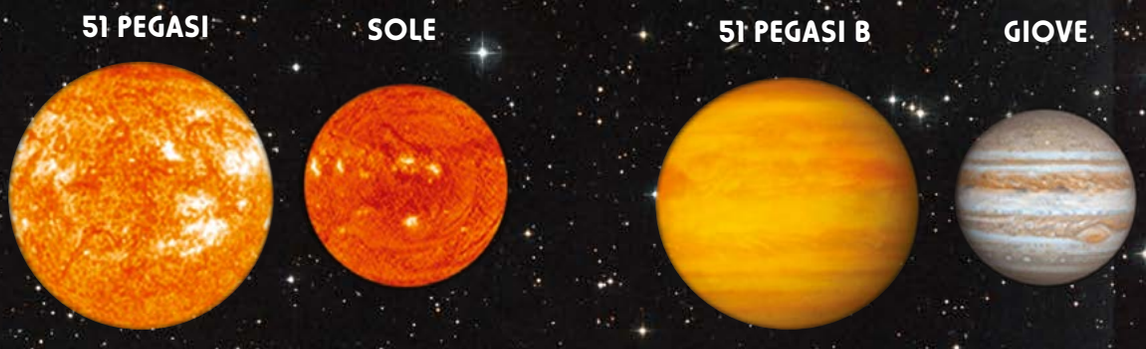
È il quesito che attanaglia gli studiosi da secoli, interrogativo divenuto ancor più drammatico alla luce della consapevolezza che quasi tutte le galassie contengono al loro interno un buco nero. La questione assunse una prima formulazione scientifica, sebbene non si ipotizzasse ancora l'esistenza dei buchi neri, solo dopo la scoperta della legge di gravitazione universale da parte di Isaac Newton, nel 1687.

L'interrogativo venne posto così dal canonico Richard Bentley in una lettera indirizzata allo stesso scienziato: se tutto si attrae, come fa l'Universo a non crollare su se stesso?
In realtà, due corpi celesti attratti reciprocamente dalla gravità, possono, dopo un primo avvicinamento, addirittura allontanarsi indefinitamente, oppure orbitare uno attorno all'altro senza mai cadersi addosso.
Anche ipotizzando che ogni galassia dell'Universo contenga un buco nero massiccio al suo interno, le zone "a rischio" sono quelle centrali, mai quelle periferiche (il Sole non cadrà mai nel buco nero centrale della nostra Galassia). Quindi difficilmente vedremo il nostro Universo, oltre tutto in espansione, interamente fagocitato dai propri buchi neri.
C'è però chi ipotizza che l'Universo stesso sia un enorme buco nero: ma allora saremmo già al suo interno! ■

NASA/JPL/ Caltech (buco nero), Commons

ALLA RICERCA DI UNA SUPERTERRA

Il primo pianeta extrasolare è stato individuato da pochi decenni. Da allora le scoperte si sono moltiplicate. L'obiettivo? Andare a caccia di un pianeta analogo al nostro, orbitante intorno a una stella simile al Sole e al di fuori del nostro Sistema Solare



Sullo sfondo, la zona di cielo intorno a 51 Pegasi in un'immagine della Digital Sky Survey 2 dell'ESO. I due disegni a lato confrontano 51 Pegasi con il Sole (è 11 per cento più massiccia e 25 volte più grande) e 51 Pegasi B con Giove (è 47 per cento meno massiccio e 50 per cento più grande)

ESO, NASA-JPL-Caltech/Digital Sky Survey 2, NASA-JPL-Caltech/confronto

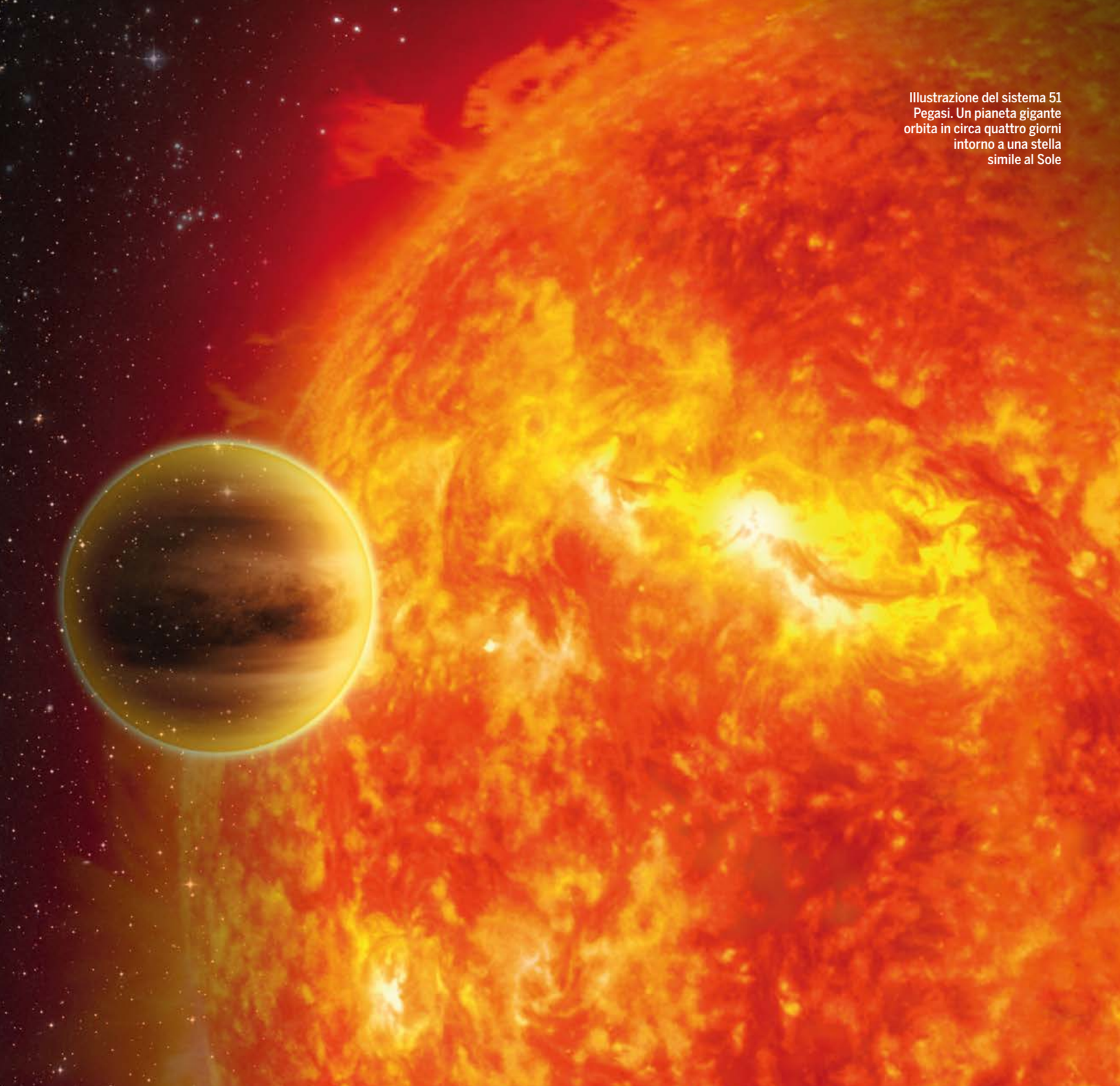
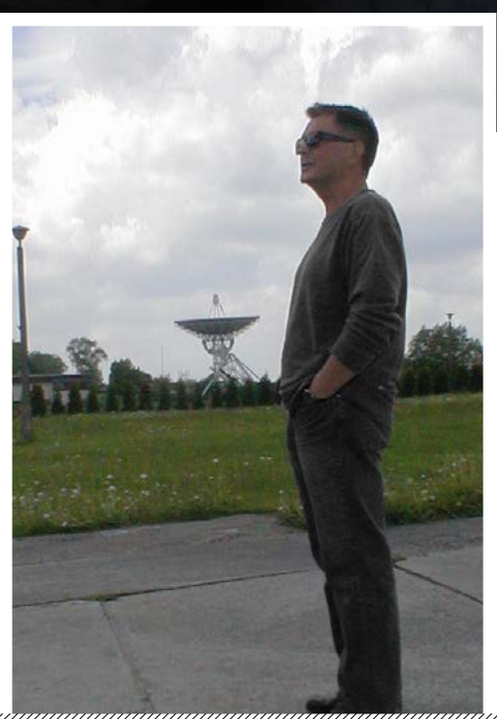


Illustrazione del sistema 51 Pegasi. Un pianeta gigante orbita in circa quattro giorni intorno a una stella simile al Sole

La prima conferma della scoperta di un pianeta esterno al Sistema Solare risale al 1992, a opera dell'astrofisico polacco Alexander Wolszczan. Lo scienziato, analizzando le emissioni radio della pulsar PSR1257+12 da lui scoperta, si accorse che non erano regolari: sembravano riflettere alterazioni provocate dall'attrazione gravitazionale esercitata da corpi orbitanti attorno a essa. Egli ipotizzò che ci fossero due pianeti, e presto l'ipotesi trovò conferme. Da quel momento, l'attesa dell'annuncio della scoperta di un pianeta extrasolare orbitante attorno a una stella ordinaria (le pulsar sono stelle di neutroni, ovvero stelle nel loro stadio evolutivo finale) diventò sempre più frenetica, e trovò la sua soluzione in un celebre congresso organizzato a Firenze il 6 ottobre 1995: fu infatti in quella data che gli astronomi svizzeri Michel Mayor e Didier Queloz, entrambi in forza all'Osservatorio di Ginevra, annunciarono la

NASA / JPL-Caltech

Illustrazione del sistema extrasolare che orbita intorno alla pulsar PSR B1257+12, scoperto da Alexander Wolszczan (nella foto a destra), nel 1992



scoperta di un oggetto di massa planetaria (0,5 volte la massa di Giove) in orbita attorno alla stella di tipo solare 51 Pegasi, distante da noi circa 50 anni luce. Fu quella la prima volta in cui gli astronomi ebbero le prove che esistono pianeti orbitanti attorno a stelle simili al Sole, ma al di fuori del Sistema Solare. Da quel momento gli esopianeti confermati hanno superato quota 3600: 3621, per la precisione, in 2712 sistemi planetari, con il dato aggiornato al primo luglio 2017, di cui oltre 2000 scoperti da un solo strumento: il telescopio spaziale Kepler, lanciato dalla NASA nel 2009 proprio con lo scopo di dare la caccia a pianeti simili alla Terra orbitanti attorno ad altre stelle. Ma molti altri sono già in lista di attesa, che aspettano semplicemente una nuova osservazione che confermi la loro presenza.

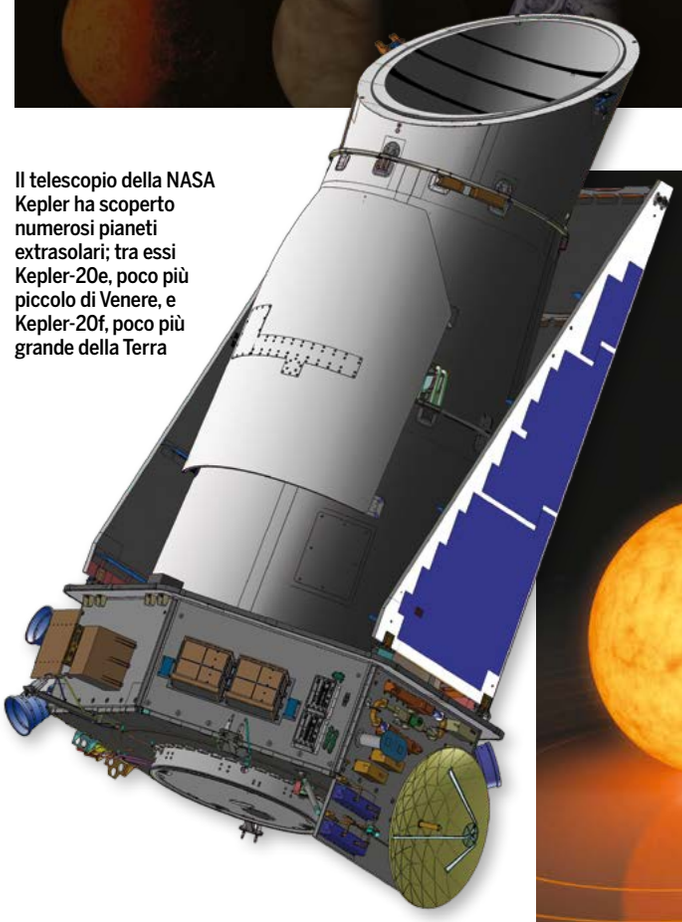
ALLA RICERCA DEL "GEMELLO"

Di tutti i pianeti scoperti sino a ora, però, solo alcuni hanno una pur vaga somiglianza con il nostro pianeta. Tuttavia, nessuno degli oltre 600 sistemi planetari extrasolari multipli – ovvero con più di un pianeta orbitante attorno alla stella centrale – assomiglia

NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC)/ PSR B1257+12, Ludek Commons/ Wolszczan

TRAPPIST-1 È UN SISTEMA PLANETARIO MOLTO SIMILE AL NOSTRO: 7 PIANETI ORBITANO INTORNO A UNA NANA ROSSA

Il telescopio della NASA Kepler ha scoperto numerosi pianeti extrasolari; tra essi Kepler-20e, poco più piccolo di Venere, e Kepler-20f, poco più grande della Terra



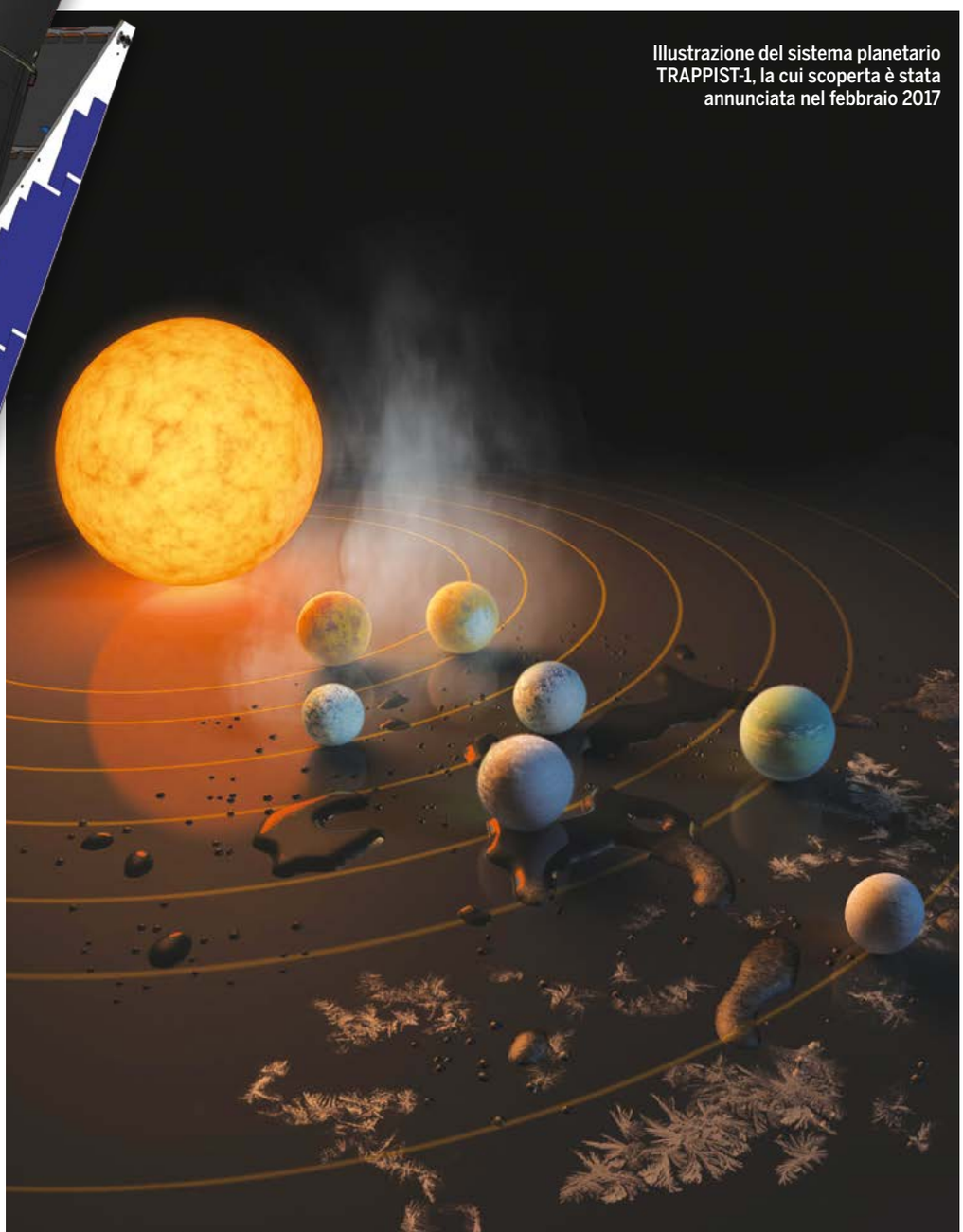
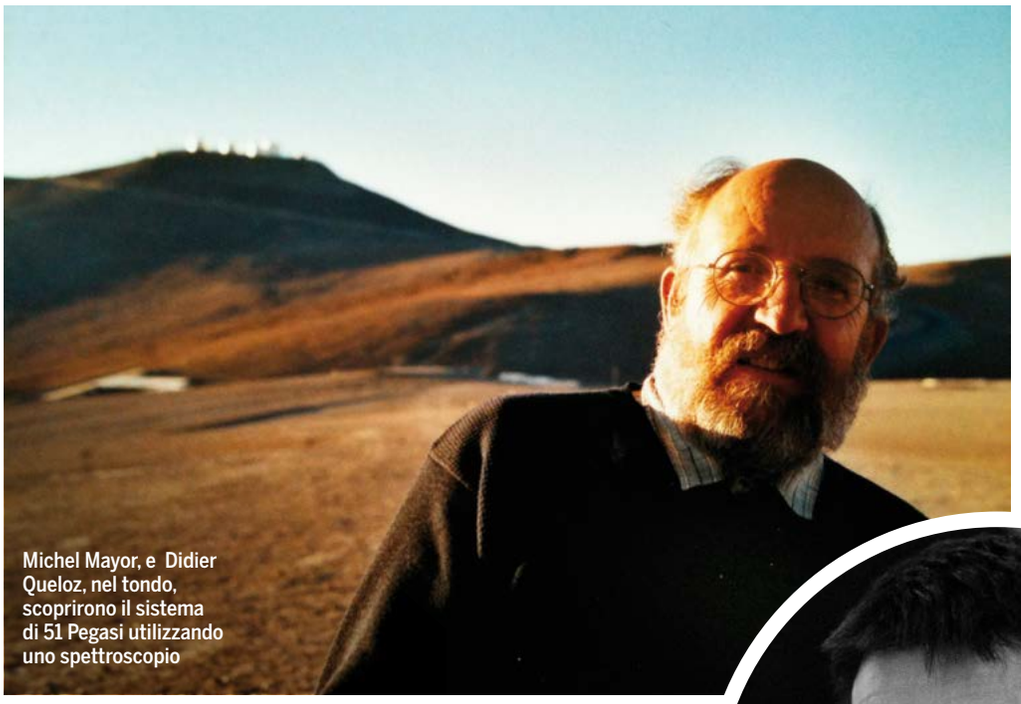


Illustrazione del sistema planetario TRAPPIST-1, la cui scoperta è stata annunciata nel febbraio 2017

realmente al nostro Sistema Solare, per numero e varietà di pianeti presenti. Fra questi, il sistema che sembra più promettente, almeno per il momento, è quello annunciato a febbraio del 2017 e denominato TRAPPIST-1: un sistema planetario distante circa 39,5 anni luce da noi in direzione della costellazione dell'Acquario, la cui stella centrale è una nana rossa, attorno alla quale orbitano ben sette pianeti. Di questi sette pianeti, i sei pianeti più interni sono probabilmente di tipo roccioso, ovvero come il nostro pianeta e gli altri pianeti del Sistema Solare interno (Mercurio, Venere e Marte). Inoltre,

NASA-Ames-JPL-Caltech/Kepler.NASA-JPL-Caltech/Trappis 1



Michel Mayor, e Didier Queloz, nel tondo, scoprirono il sistema di 51 Pegasi utilizzando uno spettroscopio

cinque di questi sono simili alla Terra per dimensioni e i restanti due sono intermedi tra Terra e Marte. Inoltre, il quarto, il quinto e il sesto pianeta si trovano a orbitare nella cosiddetta "zona abitabile", e quindi potrebbero essere dotati di un'atmosfera anche simile alla nostra, ma, soprattutto, avere sulla superficie acqua allo stato liquido.
La "zona abitabile" è infatti quella regione attorno a una stella in cui le condizioni sono tali da favorire la nascita di forme di vita (la Terra si trova proprio al centro della "zona abitabile" del Sistema Solare: né troppo vicina, come Mercurio e Venere, dove le temperature superficiali sono proibitive, né troppo lontana come Marte, dove invece le temperature sono troppo basse perché la vita possa mantenersi.
I sette pianeti di TRAPPIST-1 orbitano così vicini fra loro – le loro orbite sono decine di volte più attigue della distanza che separa l'orbita della Terra da quella di Marte – che alcuni ricercatori hanno addirittura ipotizzato che, nel caso in cui su uno dei pianeti si sia formata la vita, questa potrebbe essere stata trasferita con estrema facilità agli altri con una serie di processi di "panspermia interplanetaria", cioè il trasferimento di forme di vita (organismi semplici, tipicamente) da un corpo planetario a un altro, trasportate da eventuali comete o da asteroidi.
In TRAPPIST-1 i ricercatori stimano che il meccanismo della panspermia possa essere in ordine di grandezza più probabile rispetto, per esempio, al sistema Terra-Marte, e quindi, in estrema sostanza, rispetto al Sistema Solare nel suo insieme.

IN ASTRONOMIA CON "ZONA ABITABILE" SI INDICA UNA REGIONE DOVE È POSSIBILE PER UN PIANETA MANTENERE ACQUA ALLO STATO LIQUIDO

METODI DI INDIVIDUAZIONE DEI PIANETI EXTRASOLARI

Gli astronomi hanno sviluppato diverse tecniche per cercare di scoprire pianeti attorno ad altre stelle. Uno di questi è naturalmente l'osservazione diretta, purtroppo possibile solo per un ristretto numero di casi – soprattutto per i giganti gassosi abbastanza distanti dalla stella centrale – perché resa molto difficile dal fatto che tali corpi celesti sono ovviamente molto meno luminosi della stella attorno a cui orbitano, ragione per cui la loro osservazione è disturbata dalla luminosità della stella stessa.
La maggior parte dei pianeti è tuttavia stata scoperta attraverso tecniche di osservazione indirette. Fra queste le principali sono tre: il metodo delle velocità radiali, il metodo astrometrico e il metodo dei transiti. Il primo metodo consiste nel cercare eventuali variazioni nella lunghezze d'onda nella luce emessa da una stella. Infatti, a causa dell'effetto Doppler, si ha una dipendenza della lunghezza d'onda della luce stellare che osserviamo dal moto relativo della sorgente e dell'osservatore. Se oggetti pesanti orbitano attorno all'astro, e di conseguenza lo costringono a oscillare, la luce emessa cambia leggermente spettro. Con questo metodo è stato appunto scoperto il primo pianeta in orbita attorno a una stella di tipo solare, la 51 Pegasi, dagli astronomi Mayor e Queloz.
La seconda tecnica impiegata nella ricerca di pianeti extrasolari consiste invece nella misurazione della posizione delle stelle, ovvero nell'impiego di tecniche astrometriche. Le stelle infatti non sono fisse nel cielo, ma si spostano lentamente; l'effetto della presenza di pianeti orbitanti attorno a esse e della loro attrazione gravitazionale, determina un ondeggiamento a "zig zag" della traccia del loro spostamento, altrimenti lineare.
L'ultimo metodo, quello dei transiti, consiste infine nel cercare di rivelare

Franck Schneider Commons/Mayor. M.McCaughrean-ESA ed ESO/ Queloz

Un paesaggio immaginario del pianeta extrasolare Proxima B che orbita intorno alla nana rossa Proxima Centauri, la stella più vicina a noi, dopo il Sole

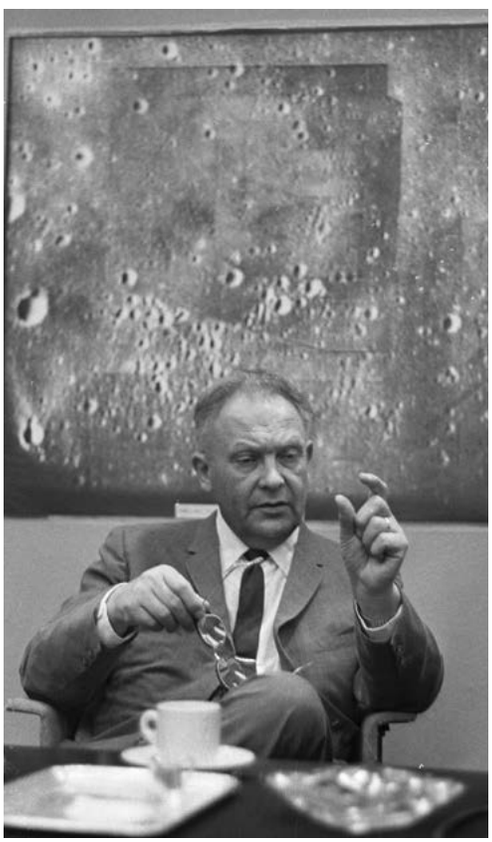
LE ORBITE IN UN CAMPO GRAVITAZIONALE

La cometa Hale-Bopp in un'immagine del 16 marzo 1997, periodo nel quale era così luminosa da poter essere vista a occhio nudo

Parlando di corpi che si muovono in un campo gravitazionale, tipicamente si afferma che vengono percorse orbite ellittiche, ma in realtà quella ellittica è solo una delle tante forme geometriche che può avere un'orbita. In generale, infatti, le orbite percorse in campi gravitazionali hanno l'aspetto di curve coniche, ovvero di ellissi, circonferenze, parabole o iperboli. Di queste quattro tipologie di curve, due sono chiuse (circonferenza ed ellisse), mentre due sono aperte (parabola e iperbole). Questo significa che non tutti i corpi in moto sotto l'influenza della gravitazione percorrono orbite periodiche: è il caso di molte comete che arrivano una sola volta in prossimità del Sole per poi allontanarsene indefinitamente per sempre, percorrendo orbite paraboliche o iperboliche. L'esempio delle comete ci permette anche di citare la difficoltà che gli astronomi hanno nel determinare esattamente la forma delle orbite, visto che per distinguere una parabola da un'ellisse fortemente allungata sono necessarie misure molto precise e su un tratto di orbita che sia il più ampio possibile. Oltre a questa difficoltà, occorre tenere presente anche il fatto che una qualunque orbita è gravitazionalmente perturbata dalla presenza di altri corpi più o meno lontani da quello in esame. L'orbita di un pianeta o di un satellite, quindi, è costantemente soggetta a variazioni dinamiche causate dai campi gravitazionali di tutti gli altri pianeti. La tecnica che gli astronomi impiegano per determinare le esatte posizioni dei pianeti lungo le rispettive orbite fa ricorso al cosiddetto metodo delle perturbazioni, il quale permette di valutare, istante per istante, l'entità delle variazioni orbitali introdotte dalla presenza di altre sorgenti di forze gravitazionali oltre a quella principale del Sole. È stato proprio grazie all'osservazione delle perturbazioni sul moto orbitale di Urano che venne scoperta l'esistenza di Nettuno, causa appunto di quelle perturbazioni. L'analisi delle perturbazioni sui moti propri di alcune stelle ha inoltre permesso di scoprire che queste facevano parte di un sistema doppio o multiplo.
Il metodo delle perturbazioni, effettuato con tecniche e metodologie diverse a seconda del campo di indagine, ha innumerevoli altre applicazioni in astronomia.

ESO-M. Kornmesser/Proxima Centauri. A. Dimai e D. Ghirardo. (Col Druscie Obs.). AAC /cometa Hale-Bopp.

leggere diminuzioni periodiche della luminosità di una stella causate dal passaggio di un pianeta di fronte a essa. L'entità del calo di luminosità permette di calcolare il diametro del pianeta (assumendo che quello della stella possa essere stimato con precisione). Perché il metodo dei transiti sia applicabile, occorre che da Terra si osservi l'orbita del pianeta quasi di taglio. Questo permette anche di determinare l'oscillazione della velocità radiale della stella (cioè della velocità della stella nella direzione della linea di vista), da cui è possibile trarre informazioni sulla massa effettiva del pianeta. Così, la conoscenza di massa e densità del pianeta permette di calcolarne la densità media e, da questa, a sua volta è possibile fare delle deduzioni sulla sua composizione – in particolare, se è formato principalmente da gas o da rocce. In alcuni casi è stato anche possibile identificare spettroscopicamente i gas nelle atmosfere di pianeti giganti in transito. Insomma, la caccia ad altri sistemi solari, e soprattutto a stelle con pianeti



L' astronomo olandese naturalizzato statunitense Gerard Kuiper scoprì la presenza di un anello di materiale cometario oltre l'orbita di Nettuno

NASA/Kepler 35A e B, Gelderen, Hugo van Anefo Commons /Kuiper

abitabili in effetti si può considerare appena cominciata, ma l'obiettivo è fissato da tempo: trovare, nella miriade di esopianeti che, ormai siamo certi, popolano la nostra Galassia, il gemello della Terra. Per scoprire se anche lì, come qua, si sono potute sviluppare forme di vita.

TIPI DI PIANETI EXTRASOLARI

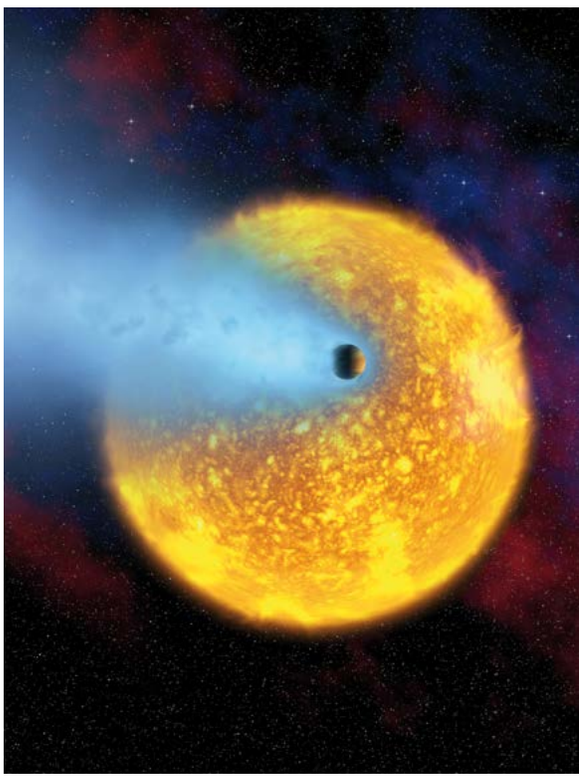
Molti esopianeti hanno dimensioni e caratteristiche simili a quelle di Giove (sono i cosiddetti hot Jupiters, Giovi caldi) o Nettuno (o intermedie fra i due) – sono i più facili da scoprire: la loro massa perturba infatti in maniera significativa il moto della stella attorno a cui orbitano –, ma questi corpi in genere orbitano così vicino alle loro stelle da avere atmosfere estremamente calde, con temperature oltre 1000 °C. Altri invece orbitano attorno a stelle fredde (uno addirittura attorno a una nana bruna, cioè una stella mancata) oppure così lontani dalle rispettive stelle da avere superfici estremamente fredde e perpetuamente ghiacciate.

Alcuni però orbitano attorno a stelle simili al Sole, hanno la superficie solida e rocciosa e un'atmosfera che potrebbe essere in grado di sostenere forme di vita (esopianeti di questo tipo ma di dimensioni più grandi della Terra vengono definiti super-Terre). D'altra parte anche la Terra è stata per lungo tempo inospitale: circa 4 miliardi di anni fa – 600 milioni di anni dopo essersi formata – entrò nell'"era del bombardamento pesante", una lunga e intensa pioggia di meteoriti che, alcuni ipotizzano, potrebbe avere portato o prodotto i "semi" chimici da cui ha poi avuto origine la vita.
Anche le stelle mancate possono avere pianeti: è il caso, per esempio, della nana bruna 2M1207, distante 200 anni luce da noi in direzione della costellazione dell'Idra. Le nane brune sono astri molto particolari: hanno infatti masse molto maggiori anche di un pianeta gigante come Giove, ma inferiori a quelle necessarie per innescare le reazioni termonucleari al loro interno. In altre parole, una nana bruna non brucia il proprio combustibile, ma è solo

Un ipotetico pianeta coperto d'acqua intorno alla stella binaria Kepler-35A e B nella costellazione del Cigno

CI SONO DIVERSI TIPI DI PIANETI EXTRASOLARI. QUELLI CON SUPERFICIE ROCCIOSA PIÙ GRANDI DEL NOSTRO SONO CHIAMATI SUPER-TERRE

La nana bruna 2M1207 (in azzurro) e il pianeta compagno che orbita intorno a essa (in rosso)



Ricostruzione di HD 209458 b in orbita intorno a una nana gialla molto simile al nostro Sole. La coda formata dalla sua atmosfera è stata confermata mediante tecniche spettroscopiche

temporaneamente calda a causa della contrazione gravitazionale. 2M1207 ha una massa stimata circa 20 volte quella di Giove. Il pianeta che orbita attorno alla nana bruna 2M1207A, noto come 2M1207b, ha una massa pari a circa 5 volte quella di Giove, ed è quindi un gigante gassoso. Orbitando a oltre 40 Unità Astronomiche dalla stella centrale, non riceve molta radiazione da questa, ma ha una temperatura superficiale stimata di oltre 1200 °C. È quindi certamente inospitale. 2M1207b è 100 volte meno luminoso della stella 2M1207A, ma il Very Large Telescope dell'Osservatorio Australe Europeo (ESO) è stato in grado di vederlo e fissarlo in un'immagine infrarossa. Si tratta quindi della prima rivelazione diretta di un esopianeta.

In direzione della costellazione del cavallo alato Pegaso, a una distanza di circa 150 anni luce da noi, si trova una stella molto simile al nostro Sole: HD 209458. Ogni tre giorni e mezzo, però, davanti a HD 209458 passa un altro oggetto che la occulta parzialmente, riducendone temporaneamente la luminosità (di appena il 2 per cento). Nel 1999, due gruppi indipendenti di ricerca scoprirono che quell'oggetto era in realtà un pianeta, avente una massa pari a circa 200 volte quella della Terra (per confronto, Giove ha 318 masse terrestri), e orbitante attorno alla stella centrale a una distanza di appena 6,5 milioni di chilometri, troppo vicino per essere minimamente ospitale. HD 209458b detiene quindi il record di primo pianeta scoperto in transito davanti alla propria stella. L'atmosfera del pianeta, composta quasi esclusivamente da idrogeno, riesce lentamente a sfuggire all'attrazione gravitazionale del pianeta stesso, formando così una sorta di coda simile a quella delle comete.

Infine sono molte le stelle attorno alle quali orbitano anelli di polveri e detriti ghiacciati. Gli astronomi ritengono che questi oggetti siano ciò che resta del processo di accrescimento che dà origine ai pianeti. In questo processo, infatti, il materiale più denso e vicino alla stella va a condensarsi in pianeti di varie dimensioni, mentre il materiale residuo viene proiettato verso l'esterno del sistema, andando appunto a costituire una fascia più o meno rarefatta di corpi di dimensioni medio-piccole, che restano in orbita attorno alla stella, trattenuti dagli effetti gravitazionali dei pianeti giganti. Anche il nostro sistema planetario ha un anello di questo tipo: è la cosiddetta "fascia di Kuiper", dal nome dell'astronomo olandese che nel 1951 ipotizzò che questa fosse l'origine delle comete a corto periodo. La fascia si estende da poco oltre l'orbita di Nettuno, a 30 Unità Astronomiche dal Sole (l'Unità Astronomica è la distanza media Terra-Sole, pari a circa 150 milioni di chilometri), fino a circa 50 Unità Astronomiche, e comprende corpi di dimensioni assai variabili: dal piccolo detrito fino a pianeti nani come Plutone. ■

ESO/2M1207, ESA, Alfred Vidal-Madjar (Inst. d'Astrophysique de Paris, CNRS, France) and NASA

ET: IL FASCINO DI MONDI LONTANI

L'esistenza di forme di vita nell'Universo suscita da sempre sentimenti contrastanti che vanno dalla curiosità al terrore. Ma oggi questa ipotesi non è più appannaggio di cineasti e scrittori di fantascienza; la ricerca si muove su basi scientifiche avanzate con l'ausilio di potentissimi radiotelescopi

Sullo sfondo di un'illustrazione di un pianeta extrasolare, il radiointerferomento di Green Bank

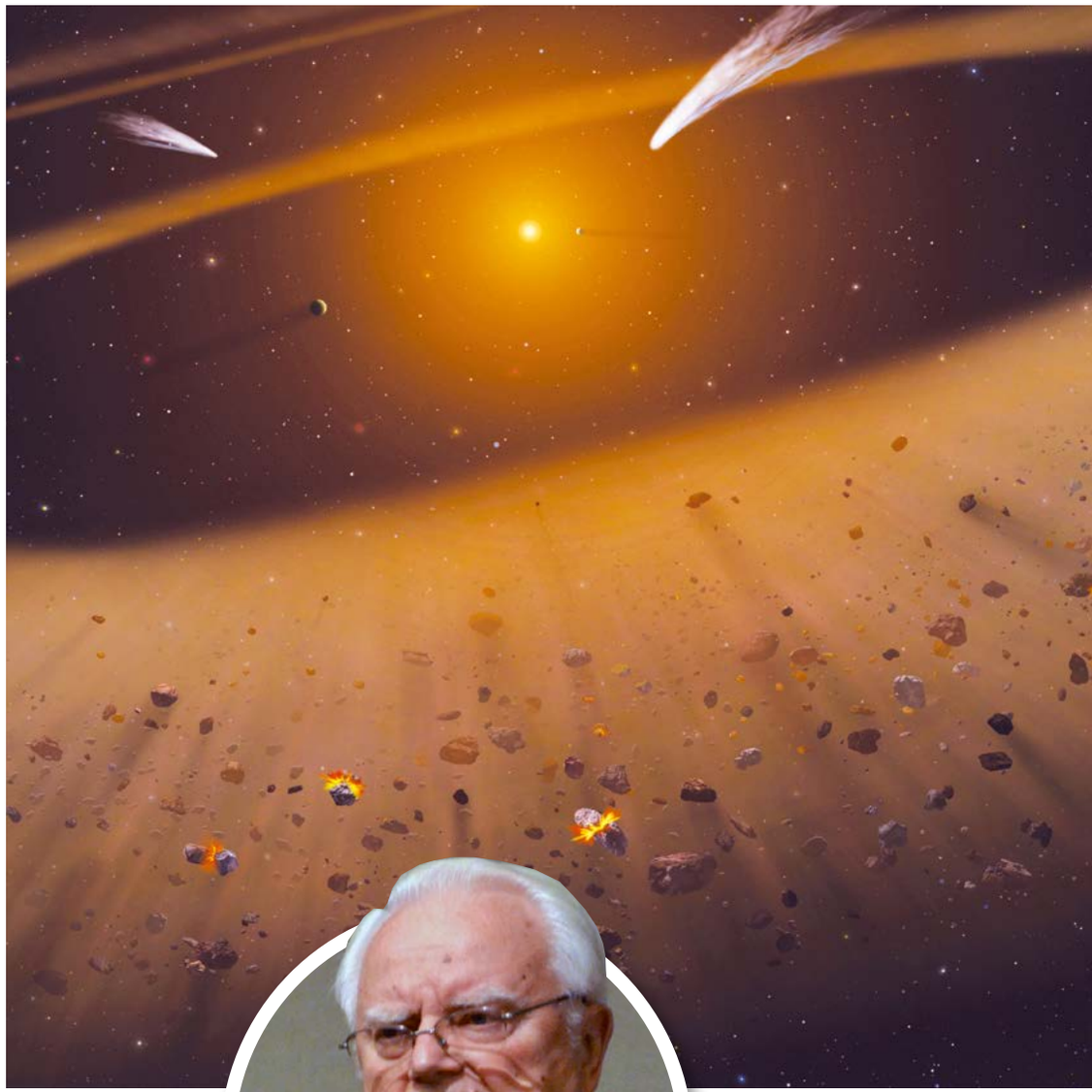
Il continuo susseguirsi di annunci relativi all'individuazione di pianeti extrasolari (cioè orbitanti attorno ad altre stelle) e l'emozione suscitata nell'opinione pubblica da questo genere di ricerche dimostrano quanto sia sempre vivo l'interesse per l'eventuale scoperta dell'esistenza di forme di vita extraterrestri. Purtroppo non è possibile sapere se fra i pianeti scoperti sino a ora qualcuno sia minimamente abitabile. Nonostante questo, l'idea, e con essa la speranza o il timore, che la Terra non sia l'unico pianeta abitato da esseri viventi nell'Universo mantiene inalterata il suo fascino. E la ricerca di esseri extraterrestri intelligenti (denominata SETI, Search for Extraterrestrial Intelligence), svolta ormai da diversi anni per mezzo di grandi radiotelescopi, poggia la sua validità su solidi argomenti scientifici. Ma facciamo un po' di storia per capire come siamo arrivati fino a qui.

SEGNALI DAL COSMO PROFONDO

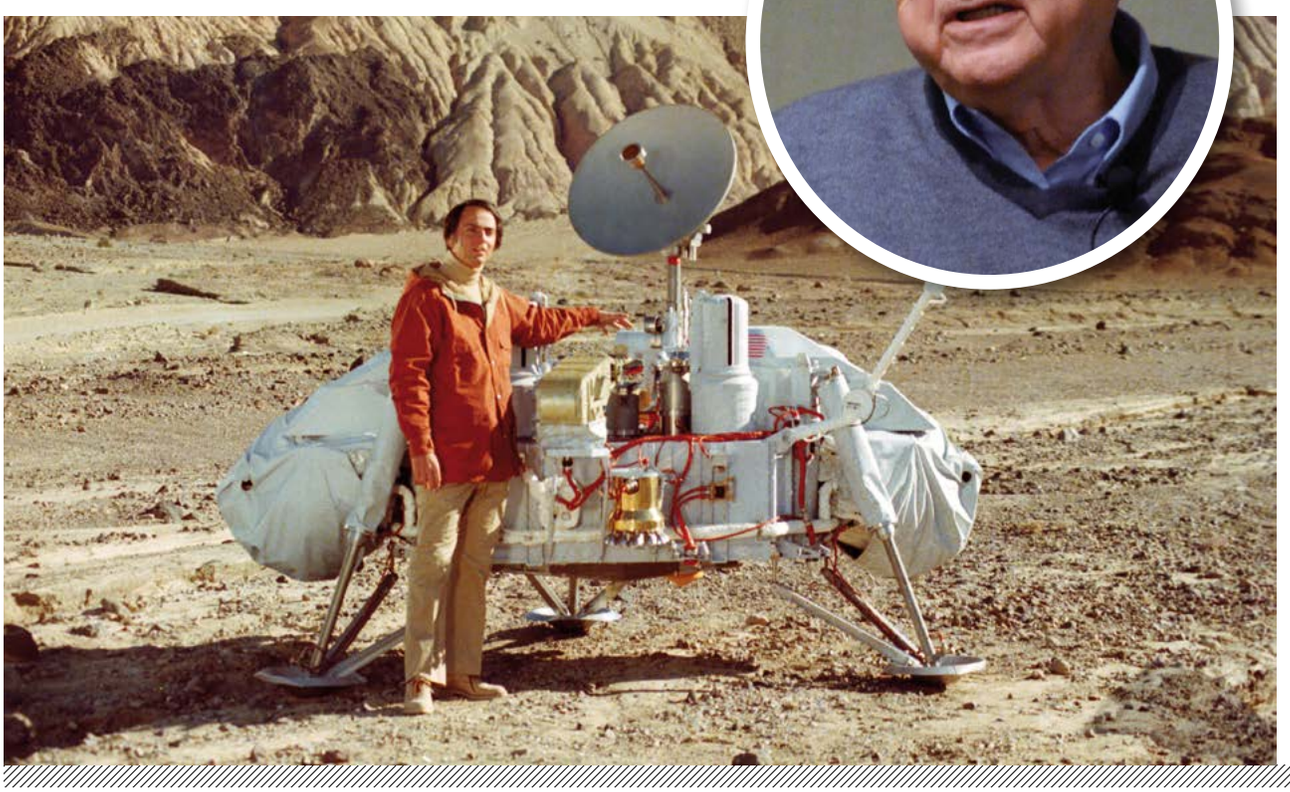
I primi a ipotizzare una possibile comunicazione extraterrestre furono l'italiano Giuseppe Cocconi e lo statunitense Philip Morrison, che, nel lontano 1959, pubblicarono sulla rivista "Nature" un breve articolo intitolato "Alla ricerca di comunicazioni interstellari", dove affrontavano le possibilità offerte dalla moderna radioastronomia per una risposta sperimentale (aspetto fondamentale) al problema.

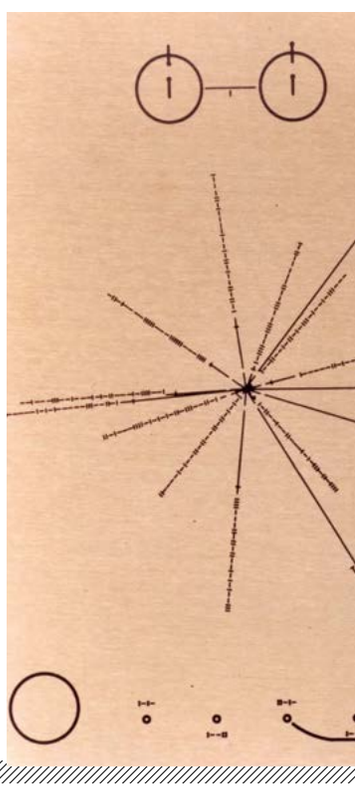
NASA, NRAO/AUI/NSF

FIN DAL 1960 LA RADIOASTRONOMIA HA PROMOSSO LA RICERCA DI CIVILTÀ INTELLIGENTI



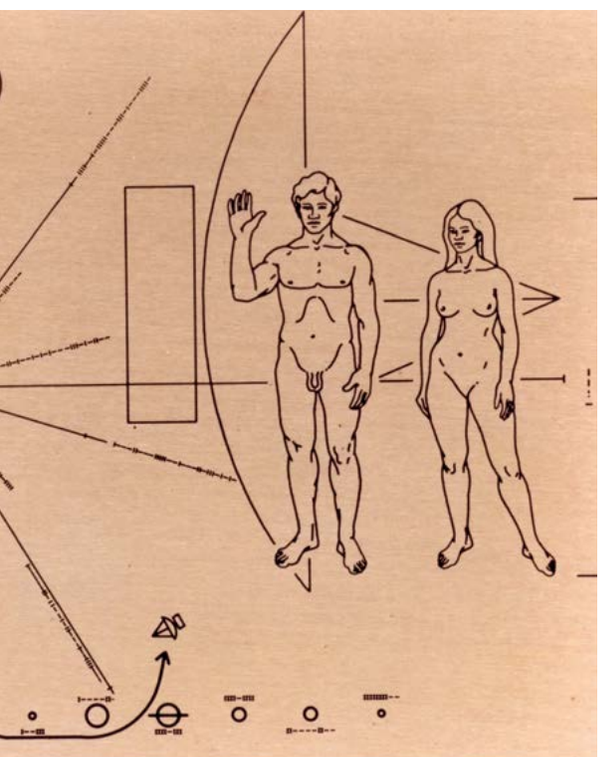
Già essi stabilirono alcuni criteri essenziali della logica con cui affrontare la ricerca. Nel 1960 Frank Drake (che assieme a Carl Sagan disegnò la famosa placca che indicava chi aveva costruito il satellite su cui era montata, il Pioneer 10, nel caso in cui uscendo dal Sistema Solare esso venisse recuperato da esseri intelligenti) fece i primi tentativi di ricezione con il radiotelescopio di Green Bank (USA).
Successivamente Drake sviluppò una





L'astronomo e astrofisico Frank Drake (qui a lato) e Carl Sagan (sotto, vicino a un modello del lander Viking nel corso delle riprese della serie televisiva "Cosmos", a Death Valley, California) disegnarono la placca (a destra), collocata sulle sonde Pioneer 10 e 11, allo scopo di inviare un messaggio nello spazio

Raphael Perrino Commons/Drake..Jet Propulsion Laboratory/Sagan.. NASA Ames Resarch Center/placca



formula, che porta il suo nome, ancora oggi impiegata per il calcolo della probabilità di esistenza di forme di vita intelligenti su altri pianeti.

IL PROGETTO SETI

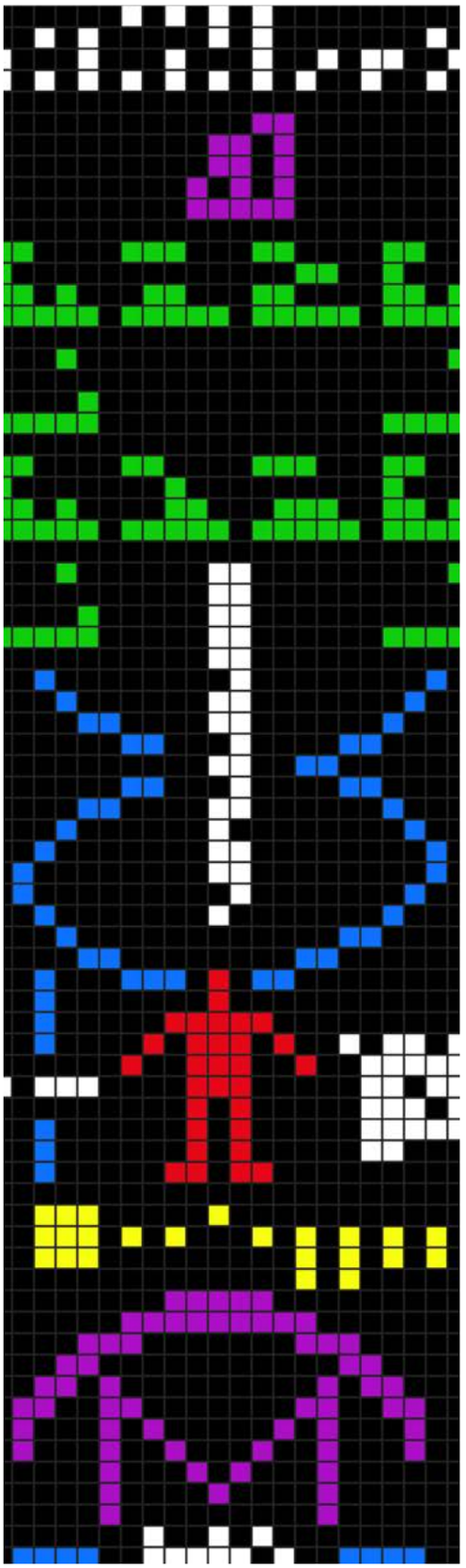
Dato che gli altri sistemi solari sono tutti troppo lontani per pensare di esplorarli direttamente con gli attuali strumenti di osservazione, oggi dobbiamo limitarci a "spiare" le eventuali civiltà aliene, per esempio indagando sull'esistenza di forme di vita nelle stelle più vicine. Queste ricerche vengono condotte utilizzando i più grandi radiotelescopi disponibili al mondo, nella speranza di captare potenziali segnali. Purtroppo, al momento, non è stato individuato alcun messaggio di sicura provenienza aliena, anche se il 15 agosto 1977 venne registrato dal radiotelescopio Big Ear della Ohio State University un segnale misterioso, di notevole intensità, e per questo battezzato "Wow!" dai ricercatori SETI. Nonostante diversi studi e proposte – la più accreditata delle quali attribuisce al segnale un'origine cometaria, proveniente in particolare dalla cometa 266P/Christensen, all'epoca sconosciuta, ancora oggi non esiste una spiegazione univocamente accettata di quel segnale, che, purtroppo, non si è più verificato. Già, perché per essere considerato veramente un segnale extraterrestre – quindi anche un eventuale tentativo di una civiltà aliena di comunicare con noi – deve naturalmente essere registrato e analizzato più volte.

Come è facile comprendere, oltre alle difficoltà teoriche, molto complesse e costose sono anche le ricerche sperimentali in tal senso, così che, con il passare degli anni e dei primi entusiasmi, i finanziamenti pubblici sono andati via via diminuendo, tanto che le ricerche si sono potute sostenere soltanto grazie all'iniziativa e ai contributi di privati (fondazioni, sponsor, mecenati).

Per questo motivo non molti anni fa è stato istituito il "SETI Institute", fondazione creata appositamente per raccogliere fondi e devolverli completamente alla missione della ricerca di forme di vita intelligenti nell'Universo. Un grosso sforzo di

A sinistra, illustrazione del sistema Epsilon Eridani. Attorno alla stella ruotano due fasce di asteroidi e più esternamente orbita un pianeta di tipo gioviano. Notevole la somiglianza con il nostro Sistema Solare

Qui sotto, il messaggio radio trasmesso nello spazio nel 1974 dal Radiotelescopio di Arecibo (Porto Rico) in direzione dell'ammasso M13

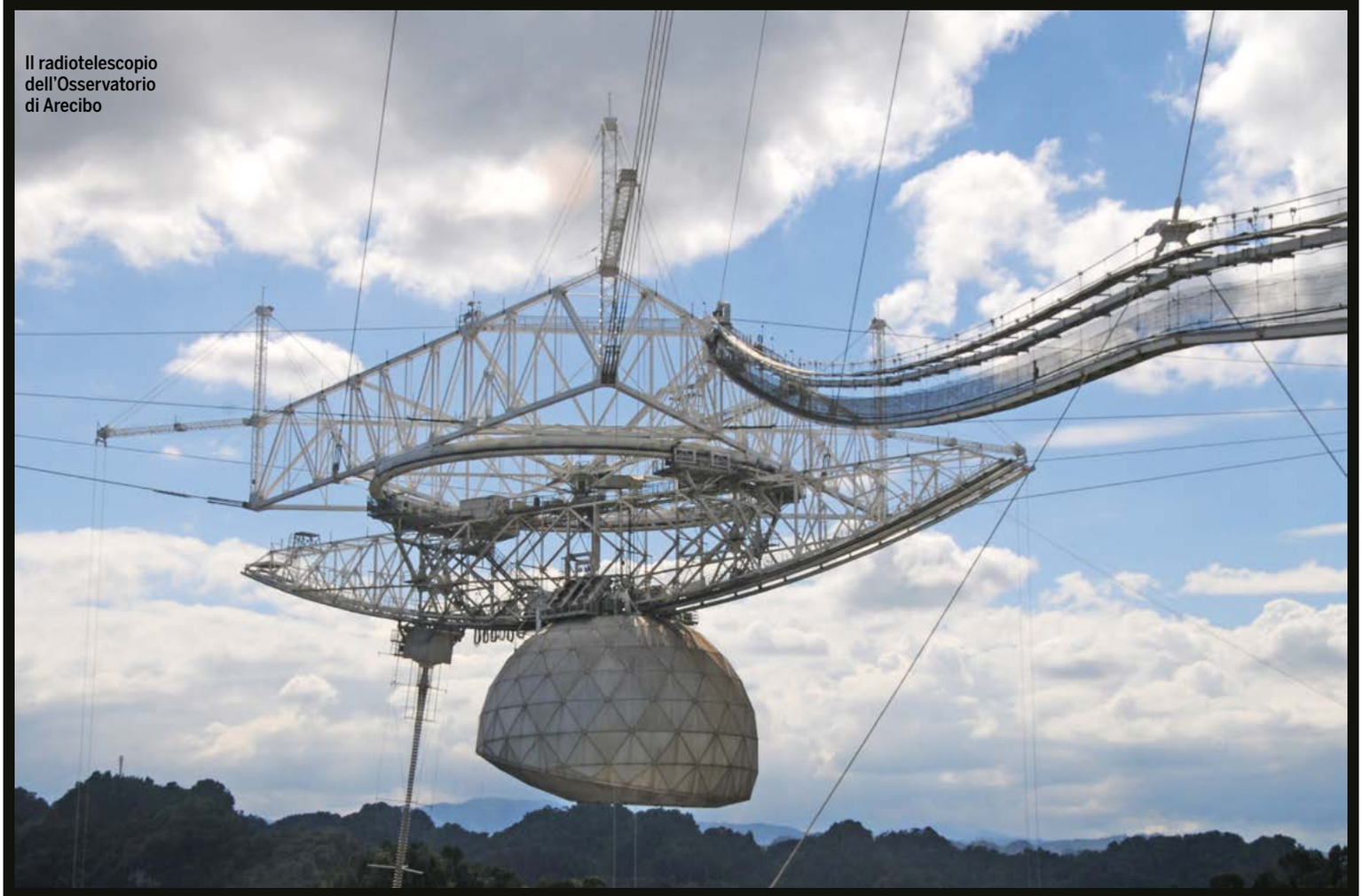


Arne Nordmann (user:norro), Commons

finanziamento e di coordinamento delle ricerche l'ha compiuto anche la "Planetary Society", associazione che fra i suoi compiti ha proprio quello di sviluppare lo studio dell'esobiologia e la ricerca di forme di vita extraterrestri. Ecco i motivi per cui ha sponsorizzato un progetto, denominato "SETI@ home" (letteralmente "SETI a casa"), operativo dal 17 maggio 1999 e ancora oggi in attività, seppure con modalità diverse da quelle originali. A "SETI@home" può partecipare chiunque in qualunque parte del mondo, è sufficiente essere dotati di un computer e di un collegamento a Internet. "SETI@home" è infatti un semplice programma salva-schermo (sono così detti - screen-saver - quei software che proteggono il monitor quando il computer è inutilizzato) che parte automaticamente quando i vostri computer non hanno altri particolari compiti da svolgere, mettendosi a elaborare l'immensa mole di dati provenienti dal radiotelescopio

"SETI@HOME" È UN PROGRAMMA CHE CONSENTE A TUTTI DI CONTRIBUIRE ALLA RICERCA

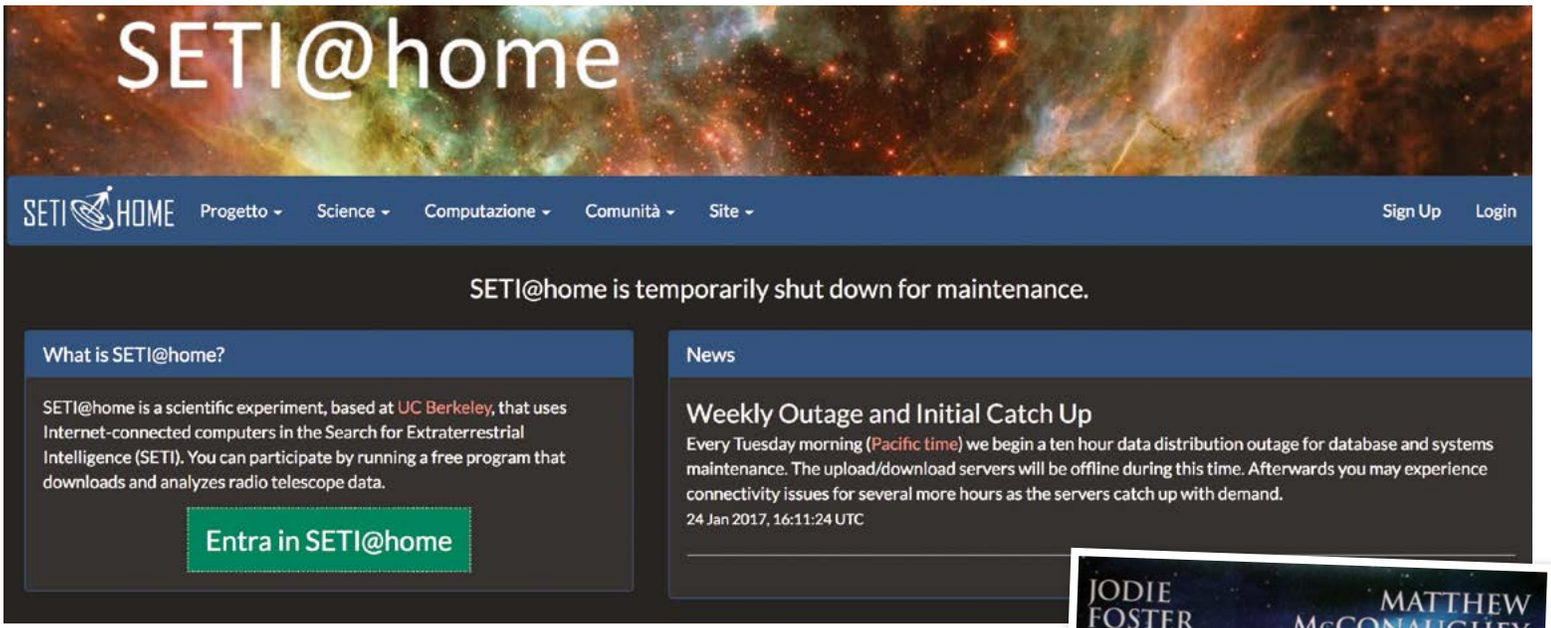
IL RADIOTELESCOPIO DI ARECIBO



Il radiotelescopio dell'Osservatorio di Arecibo

Una conca naturale immersa nella foresta tropicale trasformata nel più grande radiotelescopio del mondo: è questo l'Osservatorio di Arecibo, nell'isola caraibica di Puerto Rico (dipendenza USA), che è parte del National Astronomy and Ionosphere Center (NAIC) statunitense. Operativo 24 ore al giorno per sette giorni alla settimana (i radiotelescopi possono lavorare anche di giorno), l'enorme "piatto" – la calotta sferica che costituisce la superficie radio riflettente del telescopio – è largo 305 metri, profondo 51 metri ed è costituito da quasi 40.000 pannelli di alluminio perforato. A circa 140 metri di altezza sopra il riflettore è invece posta la piattaforma con alcuni strumenti, fra cui i ricevitori radio immersi in un bagno di raffreddamento a base di elio liquido. Con il radiotelescopio di Arecibo sono state scoperte pulsar, nubi di idrogeno, radiogalassie, quasar. Ma questo strumento è importante anche perché parte del tempo osservativo è dedicata al progetto SETI, ovvero a scandagliare zone di cielo in cerca di segnali inviati da eventuali civiltà aliene.

David Broad Commons



L'home page del sito SETI@home raggiungibile all'indirizzo: https://setiathome.berkeley.edu/

di Arecibo. L'idea che sta alla base di "SETI@home" è legata al fatto che molti progetti SETI attualmente all'opera richiedono l'impiego di grande potenza di calcolo. Allora perché non sfruttare le centinaia di migliaia di computer che quotidianamente si collegano in Internet, distribuendo per ciascuno di questi una parte dei calcoli per i quali sarebbe altrimenti necessario un supercomputer interamente dedicato? Gli ideatori, facendo stime ottimistiche, avevano sperato nella risposta di 50 mila appassionati, ma la realtà è andata ben oltre le più rosee aspettative: a oggi, oltre 6 milioni di utenti hanno aderito a questo progetto, rendendolo uno dei più grandi successi di "citizen science".
Diciamo subito, per non dare false illusioni (ma su questo anche gli organizzatori sono molto onesti), che la probabilità di incontrare il mormorio ritmico e pulsato, indizio di un segnale elaborato da una qualche intelligenza aliena, rilevandolo sopra il rumore di fondo di tutte le sorgenti radio presenti nell'Universo è assolutamente bassissima, ma chissà che a qualcuno non tocchi davvero di diventare famoso replicando le gesta di Jodie Foster nell'appassionante film "Contact", uscito nel 1997, tratto dall'altrettanto bellissimo romanzo del già citato Carl Sagan, compianto scienziato e divulgatore di grandi capacità, che partecipò, come ultimo sforzo poco tempo prima di morire, alla sua sceneggiatura. ■

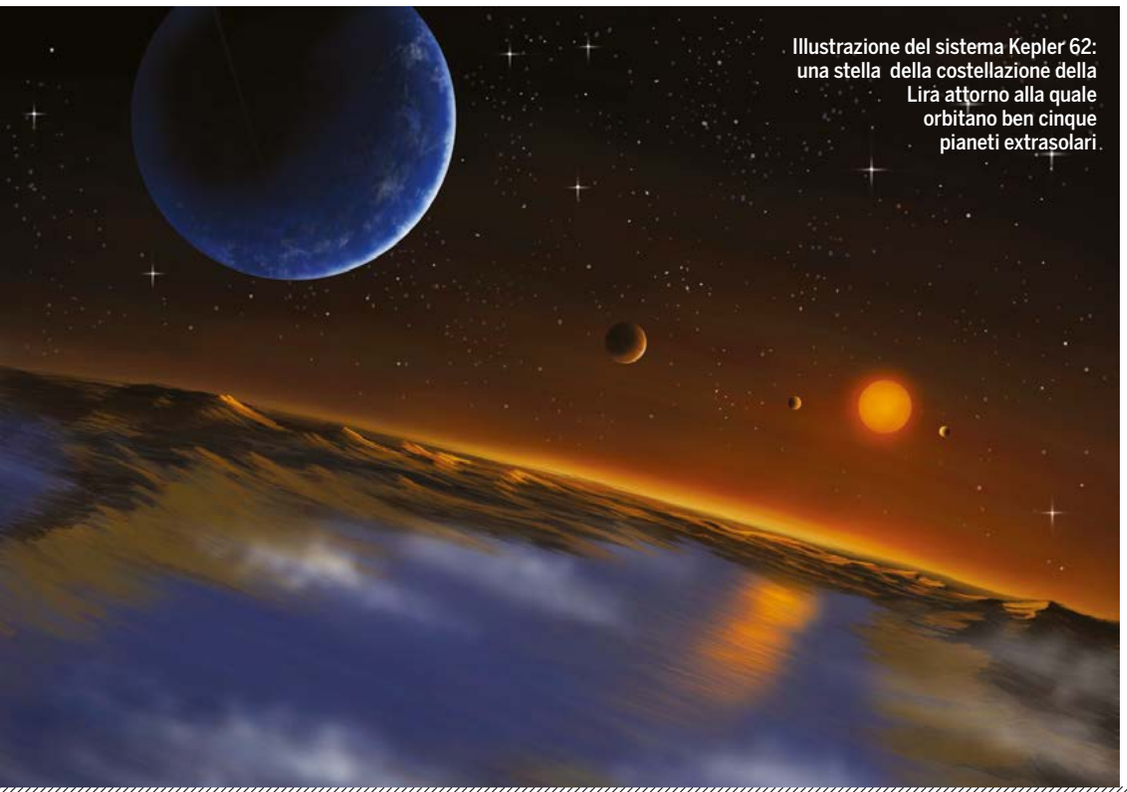
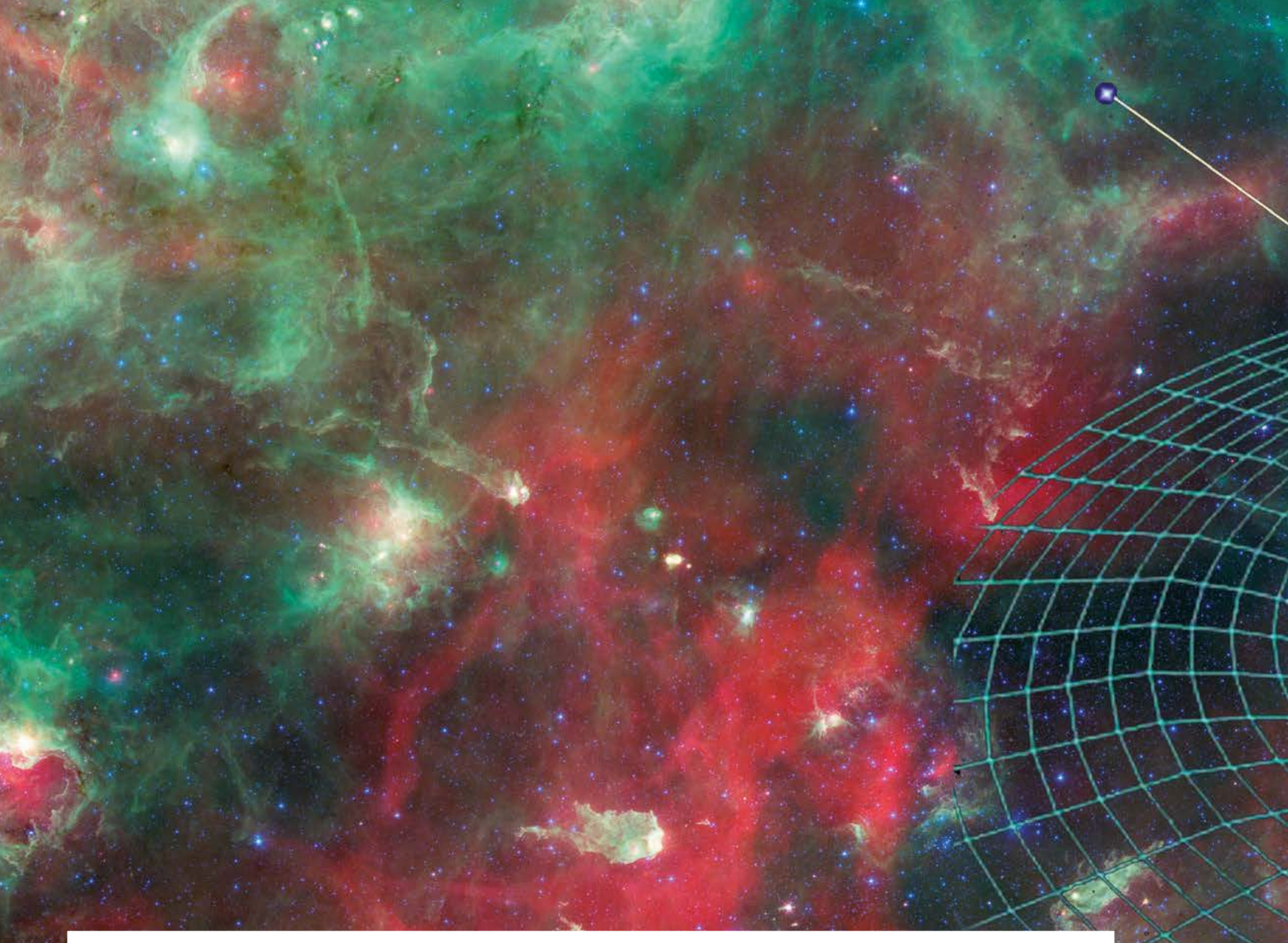


Illustrazione del sistema Kepler 62: una stella della costellazione della Lira attorno alla quale orbitano ben cinque pianeti extrasolari

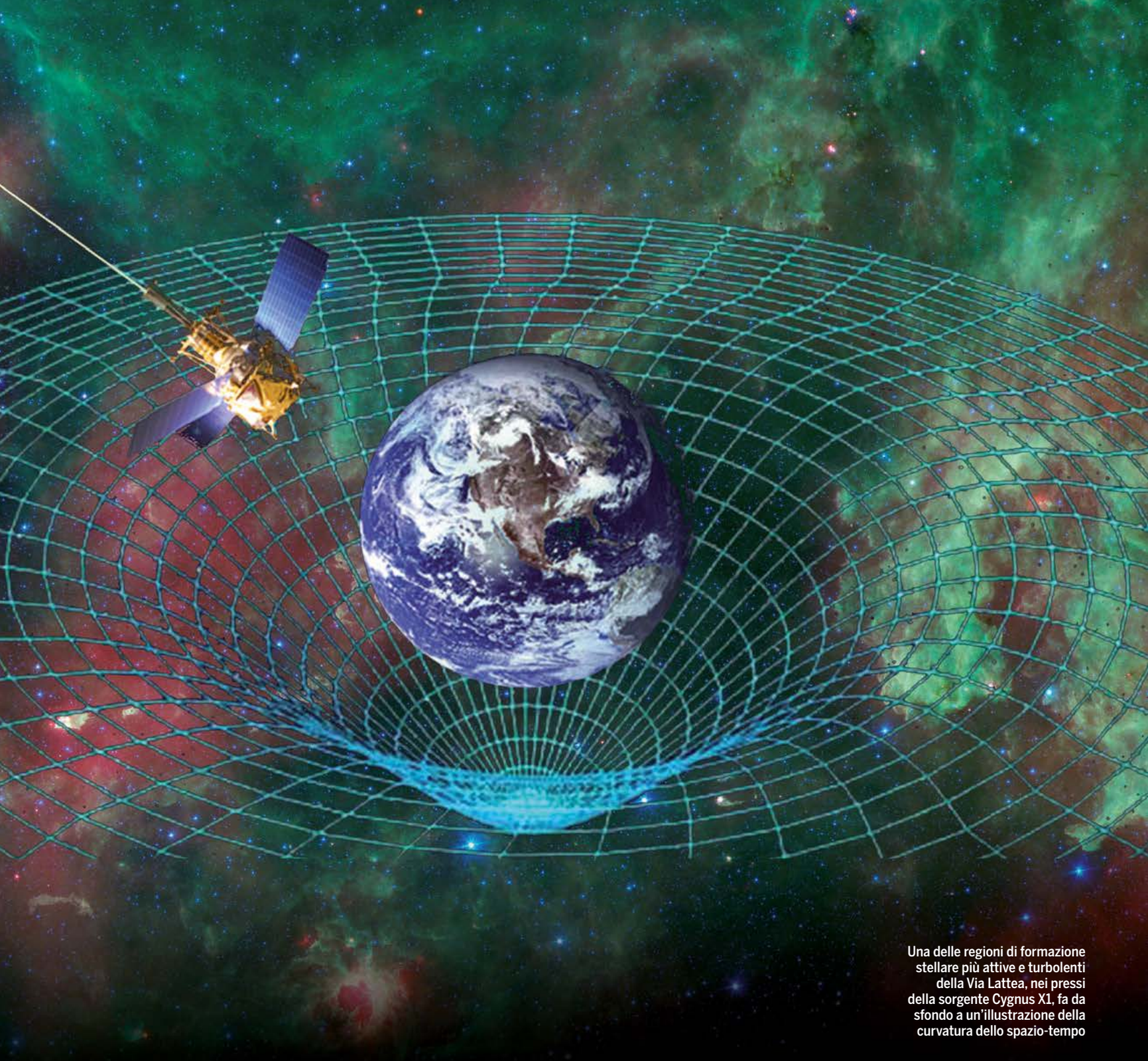
Danielle Futselaar - SETI Institute

La locandina del film "Contact", tratto dal romanzo di Carl Sagan



QUANTO È GRANDE L'UNIVERSO?

Siamo soliti pensare che il cosmo sia infinito, ma l'idea che abbia una dimensione calcolabile con le nostre conoscenze scientifiche non smette di impegnare i cosmologi. Una difficoltà immensa perché gli anni luce sono chilometri e le stelle che vediamo oggi possono essere lontane nel tempo anche migliaia di anni



Una delle regioni di formazione stellare più attive e turbolenti della Via Lattea, nei pressi della sorgente Cygnus X1, fa da sfondo a un'illustrazione della curvatura dello spazio-tempo

La cosmologia è la disciplina che studia la struttura e l'evoluzione dell'Universo nel suo insieme. È soprattutto grazie alla teoria della relatività generale di Albert Einstein che i cosmologi sono in grado di formulare ipotesi sulla storia non solo presente, ma anche passata e futura del nostro Universo. Sono le equazioni della relatività generale a permettere di calcolare come l'Universo evolve nel tempo. Sappiamo infatti che esso cambia nel tempo dalla scoperta della sua espansione, dimostrata dal moto di allontanamento collettivo delle galassie. Prima di analizzare come si è evoluto nel tempo e quanto è esteso, cerchiamo di capire meglio come funziona questa teoria. La teoria della relatività generale asserisce che gli effetti gravitazionali possono essere spiegati tramite deformazioni locali del tessuto spazio-temporale: di fatto, la forza di gravità "scompare"

NASA JPL-Caltech Harvard-Smithsonian CfA

lasciando il posto alla "curvatura" dello spazio-tempo. Per capire il significato profondo di questa teoria, occorre richiamare alcuni concetti, primo fra tutti la cosiddetta "geometrizzazione" del tempo.

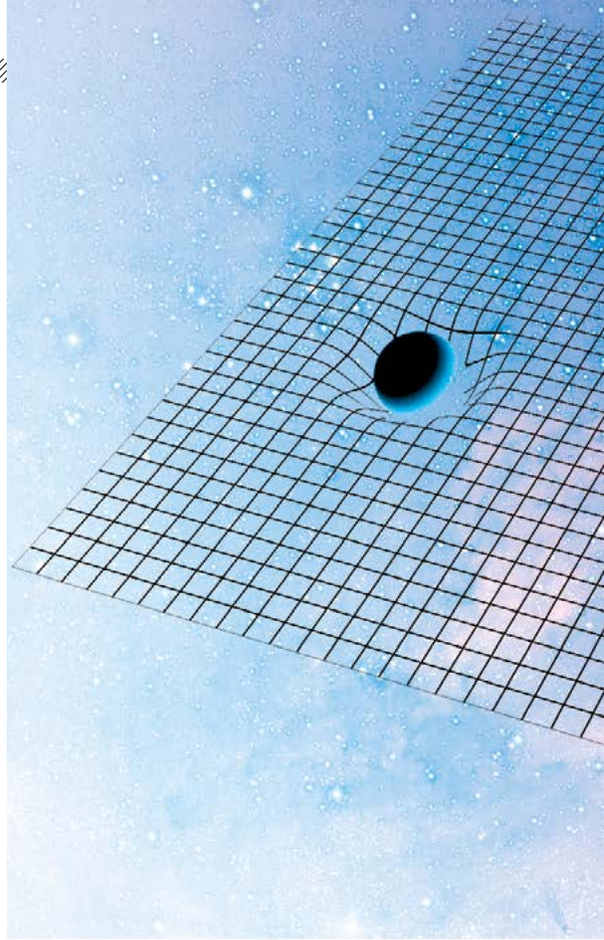
IL TEMPO COME QUARTA DIMENSIONE

Nel linguaggio quotidiano, un evento è qualcosa che avviene in un certo luogo e in un dato momento. In fisica viene definito evento l'insieme formato da un punto nello spazio e da un istante di tempo, anche se in tale punto e in quell'istante non accade niente di particolare. È perciò possibile specificare un evento per mezzo di quattro numeri (tre coordinate spaziali e un istante di tempo). Si può pensare che lo spazio e il tempo siano costituiti da eventi; l'insieme di tutti gli eventi comprende tutto lo spazio e il tempo. Le quattro coordinate di un evento ne specificano la posizione in uno spazio quadridimensionale chiamato spazio-tempo o cronotòpo.

La caratteristica geometrica necessaria per conoscere la struttura dello spazio-tempo è la curvatura. Essa deve essere definita tramite proprietà intrinseche allo spazio in questione, ovvero indipendentemente da corpi e campi in esso presenti, come pure dalla scelta del sistema di riferimento. Per capire quali sono le proprietà geometriche intrinseche di uno spazio, occorre introdurre il concetto di metrica, che, in estrema sostanza, rappresenta una generalizzazione del concetto di distanza. Per esempio, su una superficie piana, come quella di un foglio da disegno appoggiato su un tavolo, la metrica è la formula che esprime la distanza fra due punti vicini posti sulla superficie del foglio.

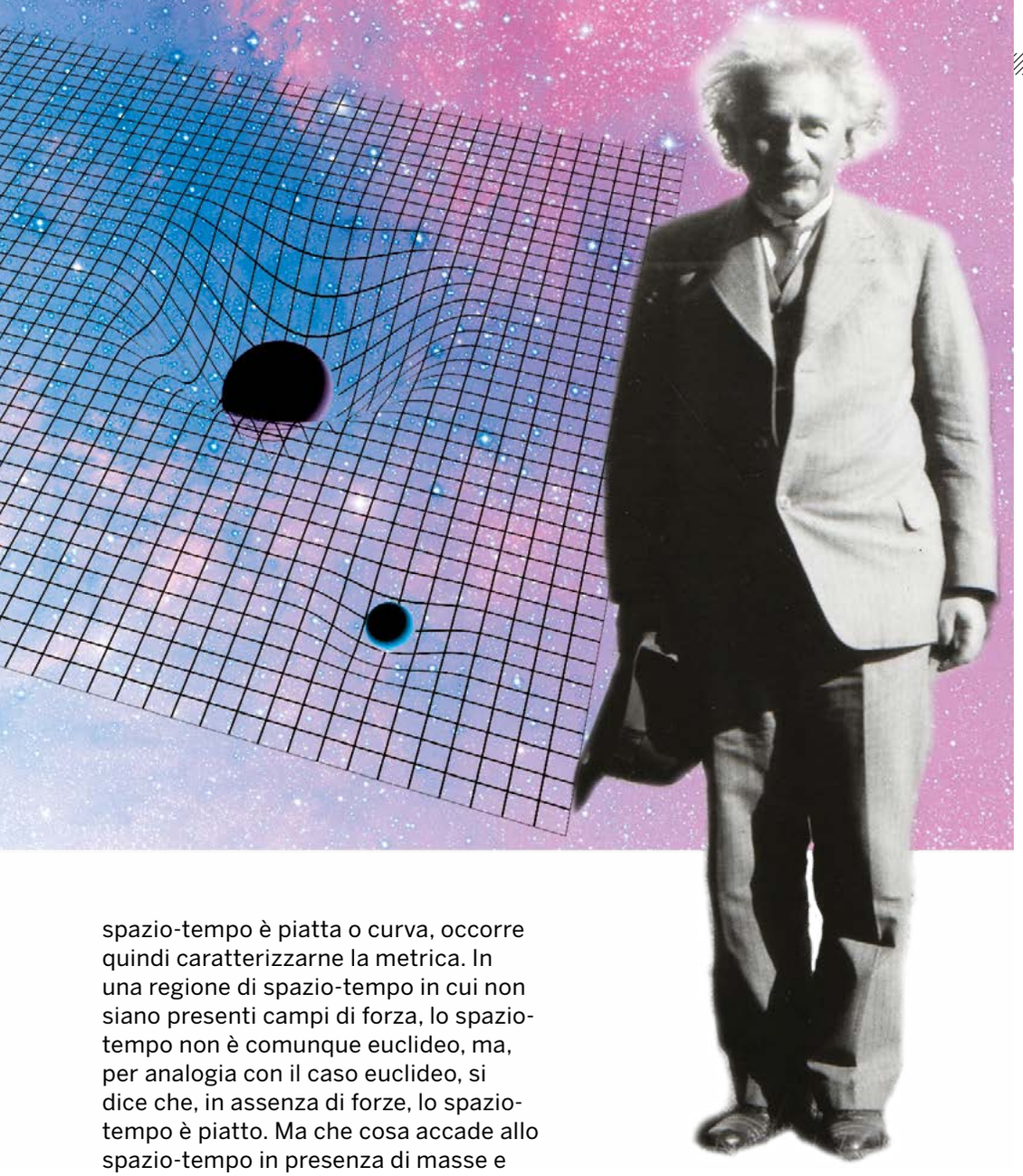
Nel caso di una superficie sferica la formula che esprime la metrica è più complessa del caso piano. Ma una volta nota, possiamo calcolare la distanza fra due punti qualsiasi posti sulla superficie. In effetti, si può verificare che la metrica contiene tutte le informazioni sulla geometria della superficie considerata. Per mezzo di essa è possibile definire un altro concetto molto importante: quello di geodetica. Una geodetica è la linea più breve che congiunge due punti assegnati. Nel caso del piano le geodetiche sono linee rette: per misurare la distanza fra due punti sul foglio appoggiato al tavolo dell'esempio precedente è sufficiente un righello. Nel caso della sfera la situazione è un po' più complicata: le geodetiche sono infatti archi di cerchi massimi, vale a dire gli archi risultanti dall'intersezione della superficie sferica con piani passanti per il centro della sfera e per i due punti assegnati. Esempi di cerchi massimi sono l'equatore e i meridiani, non lo sono invece i paralleli, perché i piani che li individuano non passano per il centro della sfera. Così, se vogliamo misurare la distanza fra Roma e New York, non possiamo tirare una linea retta usando un righello (passeremmo attraverso la Terra), ma dobbiamo tracciare sulla superficie terrestre la più breve linea curva – la geodetica, appunto – che congiunge le due città.

Per comprendere se la geometria dello



Per comprendere l'evoluzione dell'Universo un importante riferimento sono gli antichi ammassi globulari come NGC 2808, nella costellazione della Carena, uno dei pù massicci della Via Lattea: si stima contenga più di un milione di stelle

HST/NASA/ESA



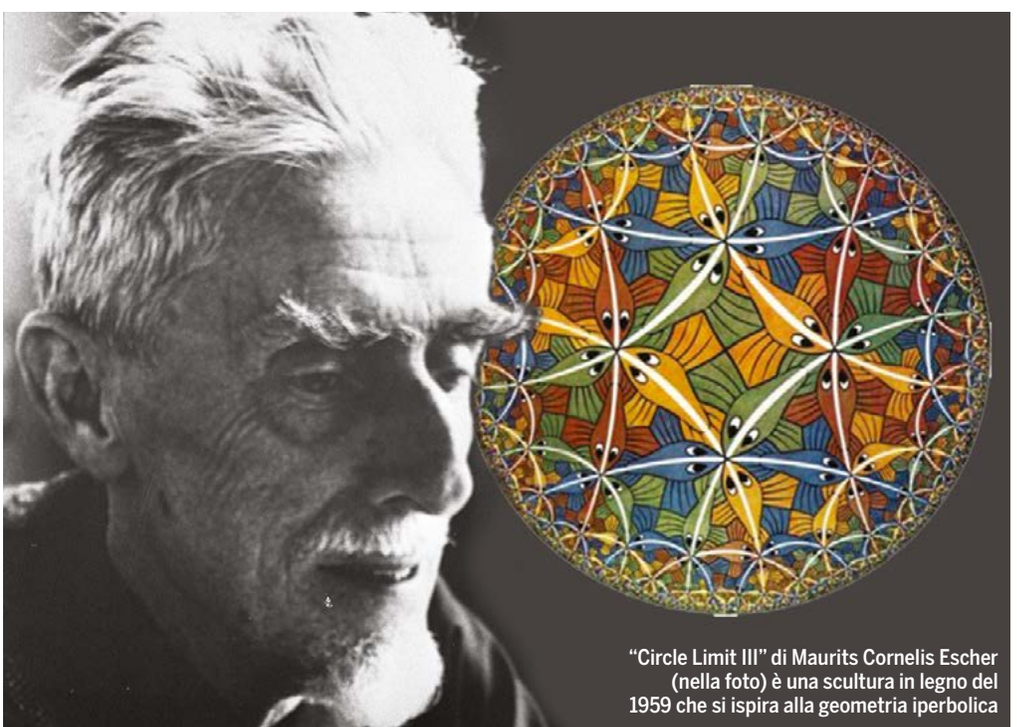
ALLE TRE COORDINATE SPAZIALI, LUNGHEZZA, LARGHEZZA E PROFONDITÀ, EINSTEIN AGGIUNGE IL TEMPO: NASCE LA QUARTA DIMENSIONE

Fu Albert Einsten a teorizzare lo spazio-tempo e la sua curvatura in presenza di una massa

spazio-tempo è piatta o curva, occorre quindi caratterizzarne la metrica. In una regione di spazio-tempo in cui non siano presenti campi di forza, lo spazio-tempo non è comunque euclideo, ma, per analogia con il caso euclideo, si dice che, in assenza di forze, lo spazio-tempo è piatto. Ma che cosa accade allo spazio-tempo in presenza di masse e campi di forze?

GRAVITAZIONE E GEOMETRIA DELLO SPAZIO-TEMPO

In presenza di un campo gravitazionale, la geometria dello spazio-tempo si modifica. L'universalità della gravità suggerisce la possibilità di attribuire allo spazio-tempo stesso le proprietà del campo gravitazionale.
Einstein formulò quindi due ipotesi: che gli effetti della gravitazione fossero espressi in termini di struttura dello spazio-tempo e che la struttura dello spazio-tempo fosse determinata dalla materia presente nello spazio-tempo stesso.
Nella relatività generale, la presenza di un campo gravitazionale si manifesta nel fatto che le geodetiche della metrica spazio-temporale passanti per due punti distinti e parallele fra loro, possono incontrarsi in un terzo punto: in altre parole lo spazio-tempo è curvo. La presenza di un campo gravitazionale corrisponde alla curvatura della geometria spazio-temporale. La gravità, quindi, cessa di essere una forza vera e propria per divenire una manifestazione della geometria dello spazio-tempo.



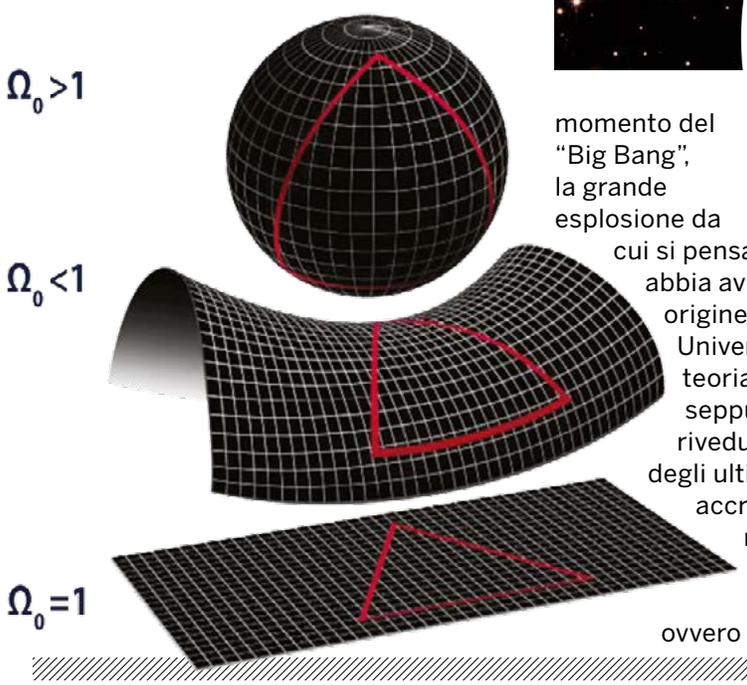
"Circle Limit III" di Maurits Cornelis Escher (nella foto) è una scultura in legno del 1959 che si ispira alla geometria iperbolica

ETH Bibliothek/Einstein. Hans Peters (ANEFO) Commons/Escher

Per trovare quale geometria spazio-temporale (ossia quale campo gravitazionale) è associata a una data distribuzione di materia, Einstein scrisse un'equazione che fondamentalmente afferma il legame fra curvatura dello spazio-tempo e densità di energia della materia. In questo modo Einstein fornì una teoria della gravitazione in cui gli effetti di quest'ultima sono pienamente espressi in termini della struttura dello spazio-tempo e in cui la struttura stessa dello spazio-tempo è legata alla distribuzione della materia.
Un modo efficace di sintetizzare l'essenza della teoria della relatività generale è la celebre frase del fisico statunitense John Archibald Wheeler: "lo spazio-tempo dice alla materia come muoversi; la materia dice allo spazio-tempo come curvarsi".

TEORIA DELLA RELATIVITÀ ED EVOLUZIONE DELL'UNIVERSO

Il moto di espansione scoperto da Hubble riguarda tutto l'Universo. Andando a ritroso nel tempo, si può provare a calcolare l'istante in cui l'espansione ha avuto inizio, ovvero il momento del "Big Bang", la grande esplosione da cui si pensa abbia avuto origine il nostro Universo. La teoria del Big Bang, seppure ampiamente riveduta e corretta nel corso degli ultimi decenni, è la più accreditata teoria sulla nascita e l'evoluzione dell'Universo. Dalla densità dell'Universo, ovvero dalla quantità di materia ed energia contenuta al suo interno, dipendono la sua evoluzione complessiva e le sue sorti, come appunto descritto dalle soluzioni delle equazioni della relatività generale. In particolare, possiamo avere un Universo aperto che si espande indefinitamente, un Universo piatto, pure in espansione indefinita, ma più lenta, e infine un Universo chiuso, dove alla fase di espansione segue una contrazione che porta a una grande implosione, il



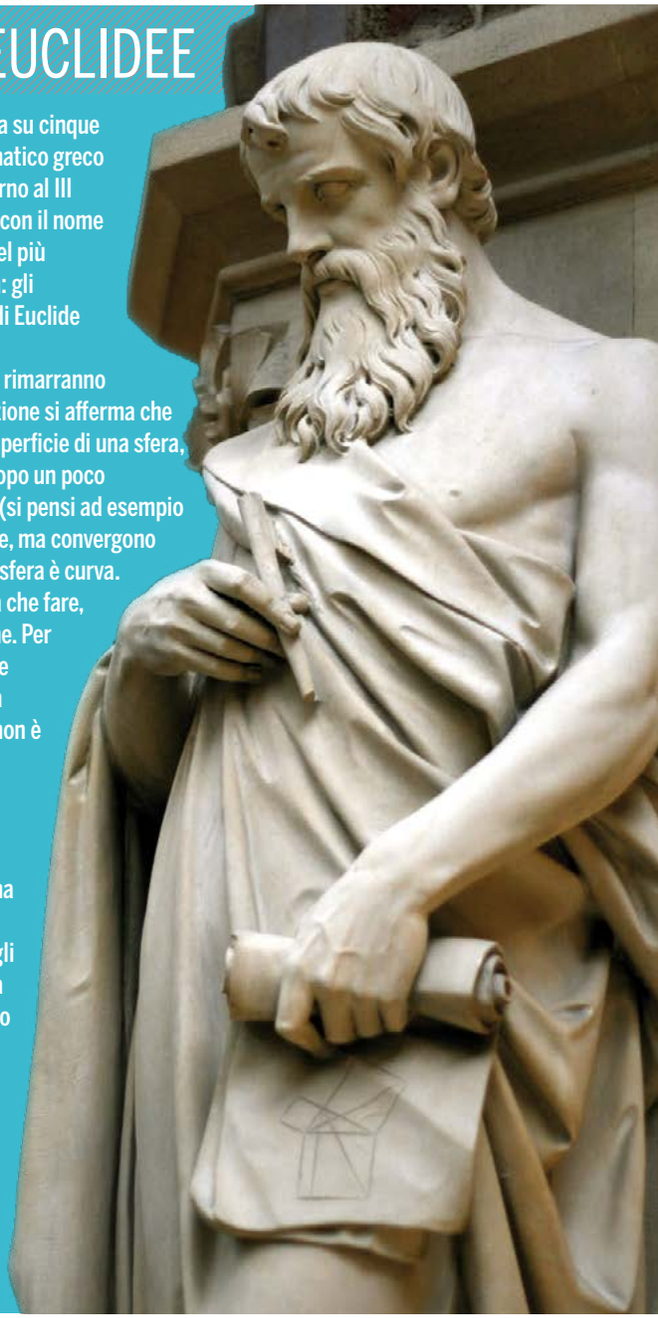
L'immagine rotonda mostra l'ammasso globulare M5, uno dei più antichi della Via Lattea. La maggior parte delle sue stelle si è formata più di 12 miliardi di anni fa. Sotto, dall'alto verso il basso, un modello di Universo sferico, uno di iperbolico e uno piatto

ESA Hubble NASA Gilles Chapdelaine/NGC 6535, ESA Hubble NASA/M5, NASA Gary Hinshaw/modelli Universo

Un ammasso globulare molto denso di antichissime stelle: NGC 6535, nella costellazione del Serpente, dista da noi ben 22.000 anni luce

GEOMETRIE NON EUCLIDEE

La geometria che impariamo a scuola si basa su cinque principi fondamentali, formulati dal matematico greco Euclide, che visse ad Alessandria d'Egitto attorno al III secolo avanti Cristo. Questi principi sono noti con il nome di "postulati di Euclide" e vennero enunciati nel più importante trattato matematico dell'antichità: gli "Elementi". In particolare, il quinto postulato di Euclide recita che due rette (geodetiche, nella nostra generalizzazione) che siano parallele all'inizio rimarranno sempre parallele. Per descrivere questa situazione si afferma che la geometria euclidea è piatta. Invece, sulla superficie di una sfera, due geodetiche che all'inizio siano parallele dopo un poco divengono convergenti e infine si intersecano (si pensi ad esempio a due meridiani: partono paralleli dall'equatore, ma convergono sui poli). Si dice quindi che la geometria della sfera è curva. A seconda del tipo di geometria con cui si ha a che fare, anche le figure cambiano le loro caratteristiche. Per esempio, se consideriamo un triangolo, è facile dimostrare usando i postulati di Euclide che la somma dei suoi angoli interni è 180°. Questo non è più vero su una superficie sferica come quella della Terra, dove i triangoli (i cui lati devono essere ovviamente archi di cerchi massimi) hanno la somma degli angoli interni sempre maggiore di 180°. Se, ancora, consideriamo una superficie come quella di una sella, su questa possiamo costruire triangoli la cui somma degli angoli interni è sempre minore di 180°. Questa della somma degli angoli interni di un triangolo può quindi essere un criterio per capire di quale superficie si tratta e quindi quale geometria applicare. Le geometrie non euclidee sono genericamente definite geometrie curve.



Euclide. Statua conservata nel museo di storia storia naturale all'Università di Oxford, Gran Bretagna

Mark A. Wilson, Dep. of Geology, The College of Wooster, Commons

L'IPOTESI OGGI PIÙ ACCREDITATA È CHE L'UNIVERSO SIA PIATTO E INFINITAMENTE IN ESPANSIONE

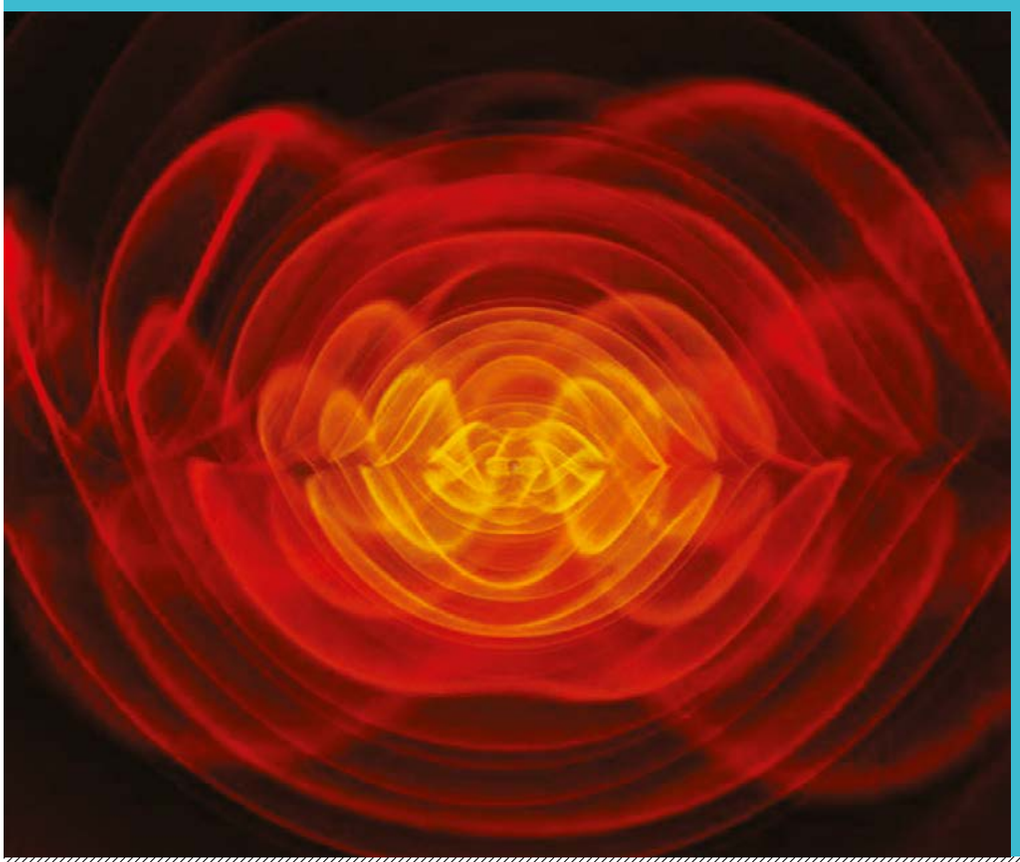
"Big Crunch", e la rinascita di un nuovo Universo. Quest'ultima ipotesi è detta dell'Universo oscillante.
L'evoluzione dell'Universo dipende infatti dalla geometria dello spazio-tempo, determinata a sua volta dalla densità totale di massa-energia, ovvero dalla quantità di materia e di energia che esso contiene, che è definita dal cosiddetto "parametro di densità" Ω_0 (omega-zero). Se questo parametro è minore di 1, l'Universo è a geometria iperbolica (come quella della superficie a sella), aperto e si espanderà all'infinito; se invece il parametro di densità è uguale a 1, l'Universo è piatto, ma è ancora aperto, anche se si espanderà sempre più lentamente; se, infine, il parametro di densità è maggiore di 1, l'Universo è a geometria sferica, chiuso e, in un lontanissimo futuro, il suo destino sarà quello di collassare nuovamente su se stesso.
Le più recenti osservazioni, in particolare delle proprietà della radiazione cosmica di fondo a microonde, propendono per un Universo piatto e infinitamente in espansione, che secondo la teoria dell'Universo inflazionario, sviluppo di quella del Big Bang, ha avuto origine da una fluttuazione quantistica del vuoto.

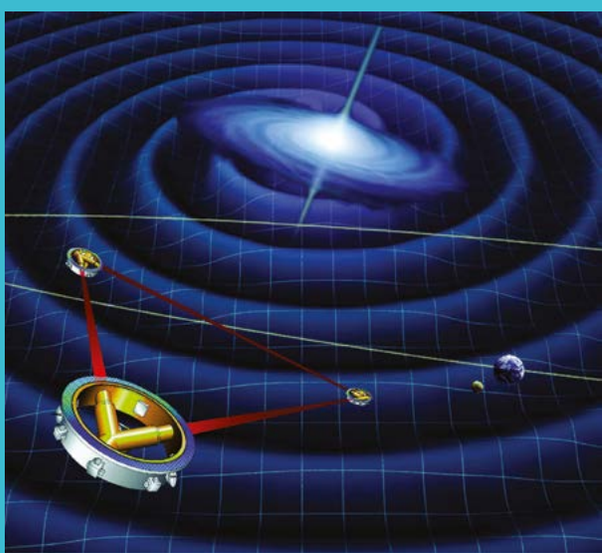
continua a pag **92**

LE ONDE GRAVITAZIONALI

Per quanto riguarda le onde gravitazionali, solo di recente si è finalmente avuta la conferma diretta della loro esistenza grazie alle osservazioni delle antenne gravitazionali appositamente progettate allo scopo. La teoria della relatività prevede infatti che, per esempio, un sistema binario stretto composto da stelle compatte – come una stella di neutroni e un buco nero, o due buchi neri, appunto – emetta onde gravitazionali, a spese dell'energia totale del sistema stesso. Le onde gravitazionali sono rappresentabili come "increspature" temporanee nel tessuto spazio-temporale, che al loro passaggio varia la propria curvatura. Il passaggio di un'onda gravitazionale è quindi percepito da un corpo come una piccola variazione locale della curvatura dello spazio-tempo. Ma come si rivelano le onde gravitazionali? Essenzialmente esistono due tipologie di rivelatori di onde gravitazionali.
I primi a essere sviluppati sono state le antenne risonanti criogeniche (ovvero raffreddate a temperature molto basse, in modo da ridurre al minimo i disturbi dati dall'agitazione termica di atomi e molecole), come quella realizzata da Joseph Weber dell'Università del Maryland alla fine degli anni Sessanta, costituite da una grande massa cilindrica di alluminio di cui si va a misurare le oscillazioni al momento dell'eventuale passaggio di un'onda gravitazionale. La generazione successiva di rivelatori è costituita dagli interferometri laser, come quello del progetto VIRGO (frutto di una collaborazione italo-francese), realizzato a Cascina, vicino a Pisa. Qui le lunghezze di due bracci, posti perpendicolarmente fra loro e lunghi ciascuno 3 km, vengono costantemente misurate da due fasci di luce laser, che vengono poi "incrociati" (ovvero fatti interferire). Una minima variazione della lunghezza del percorso – causata appunto dal passaggio di un'onda gravitazionale – verrebbe rivelata dall'alterazione della figura d'interferenza generata dai due fasci laser. Nel mondo sono già operativi o in costruzione altri sistemi di rivelazione a interferometria ottica simili a VIRGO, tutti realizzati con gli stessi obiettivi di VIRGO e in stretta collaborazione fra loro per confrontare i dati e confermare i rispettivi risultati: l'anglo-tedesco GEO 600 (Gravitational European Observatory) in Germania, il KAGRA (Kamioka Gravitational Wave Detector) in Giappone, ma soprattutto i due LIGO (Large Interferometer Gravitational-Waves Observatory) negli Stati Uniti, al momento gli unici capaci di raccogliere i segnali di ben tre eventi di fusioni di buchi neri e poter annunciare la tanto attesa rivelazione diretta delle onde gravitazionali.

Nel 2015, per testare la strumentazione di LISA è stata messa in orbita una sonda, LISA Pathfinder, qui in fase di assemblaggio al Centre Spatial Guyanais, Kourou, Guyana francese





LISA (Laser Interferometer Space Antenna) è una missione ESA/NASA, prevista per il 2034, con lo scopo di indagare le onde gravitazionali. Tre saranno i satelliti messi in orbita attorno al Sole

A sinistra. Questo lo scenario che ci apparirebbe se potessimo vedere le onde gravitazionali emanate dallo scontro titanico di due buchi neri

ESA CNES-Arianespace Optique Vidéo du CSG - P. Baudon/LISA. NASA C. Henze/onde gravitazionali

LO STUDIO DELLE ONDE GRAVITAZIONALI SARÀ AFFIDATO A LISA UNA MISSIONE PREVISTA PER IL 2034

Il fisico statunitense Joseph Weber sviluppò i primi rilevatori di onde gravitazionali

Uno dei due laboratori LIGO, quello vicino a Livingston, in Louisiana

Ma l'Agenzia spaziale europea ESA ha già in fase avanzata di studio LISA (Laser Interferometry Space Antenna), un progetto, il cui lancio è attualmente previsto per il 2034, finalizzato appunto a indagare sulle onde gravitazionali per mezzo di una costellazione di tre satelliti posti in orbita attorno al Sole a una distanza da esso pari alla distanza Terra-Sole (1 Unità Astronomica, 150 milioni di chilometri). Dopo varie rielaborazioni, nella versione attualmente approvata i tre satelliti, ai vertici di un triangolo equilatero, disteranno fra loro 2,5 milioni di chilometri, e la loro separazione reciproca verrà appunto misurata tramite un interferometro laser, in grado di rivelare le potenziali variazioni infinitesime indotte da un'onda gravitazionale di passaggio. Intanto, in preparazione di tale missione, alla fine del 2015 l'ESA ha lanciato la sonda denominata "LISA Pathfinder", il cui scopo è proprio quello di mettere a punto la tecnologia necessaria per il buon funzionamento di LISA.

US Navy via Commons /Weber, Calteeh MIT/LIGO Lab.

segue da pag 89

LA COSTANTE DI HUBBLE, L'ETÀ E LE DIMENSIONI DELL'UNIVERSO

Le osservazioni più recenti ci dicono che la costante di Hubble vale circa 70 chilometri al secondo per Megaparsec (1 Megaparsec, pari a un milione di parsec, vale circa 3,26 milioni di anni luce). Questo significa che a ogni Megaparsec in più di distanza, si osserva che la velocità delle galassie aumenta di 70 chilometri al secondo. In pratica, più le galassie sono lontane da noi, maggiore è la loro velocità di allontanamento.

Un aspetto importante della costante di Hubble è che il suo inverso è un tempo. Se l'Universo si fosse sempre espanso a velocità uniforme, l'inverso della costante di Hubble corrisponderebbe all'età stessa dell'Universo, proprio perché questa costante rappresenta il tasso attuale dell'espansione cosmica. I cosmologi usano pertanto questo valore come stima del tempo intercorso dal Big Bang o oggi.

Grazie a misure sempre più accurate della costante di Hubble, adesso sappiamo che l'età attuale dell'Universo è di circa 13,8 miliardi di anni, in ottimo accordo con le età delle stelle più vecchie.

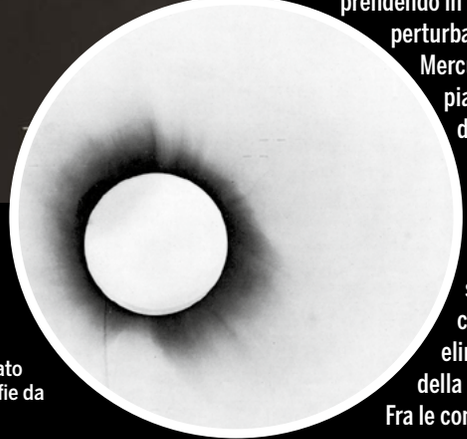
A questo punto, conoscendo l'età dell'Universo e qual è il valore del suo tasso di espansione (ovvero a quale velocità si espande), diventa possibile stimare le dimensioni dell'Universo. Considerato quanto tempo è trascorso dal Big Bang e, nel frattempo, di quanto si è espanso l'Universo, grazie alla teoria della relatività generale è possibile calcolare il raggio dell'Universo osservabile, che risulta essere pari a circa 47 miliardi di anni luce. In pratica, noi siamo in grado di osservare una sfera avente un diametro di 94 miliardi di anni luce. Questa sfera definisce appunto l'Universo osservabile, che è chiamato così proprio perché, dalla superficie di questa sfera – chiamata "orizzonte cosmologico" –, la luce, che ha una velocità molto alta, ma comunque limitata, ha fatto in tempo a raggiungerci. In pratica, noi vediamo

Terzan 5, nella costellazione del Sagittario, è un antico ammasso globulare molto particolare, infatti, presenta tipi di stelle con elementi ed età molto diversi, arrivando ad avere una differenza anche di 7 miliardi di anni

APPLICAZIONI DELLA RELATIVITÀ GENERALE

La relatività generale, proprio a causa della sua natura di teoria della gravitazione, ha innumerevoli conseguenze in campo astrofisico e cosmologico. La prima previsione, dimostrata sperimentalmente pochi anni dopo l'enunciazione della teoria, è la deflessione dei raggi di luce ad opera del campo gravitazionale. La misura fu eseguita la prima volta nel 1919 in occasione di un'eclisse totale di Sole, osservando le posizioni apparenti di alcune stelle di sfondo in prossimità del disco solare occultato dalla Luna e confrontandole con le rispettive posizioni assunte a distanza di sei mesi, quando quelle stesse stelle si trovano dalla parte opposta del Sole rispetto alla Terra e possono essere osservate di notte. La deflessione della luce è anche all'origine del fenomeno delle lenti gravitazionali: quando lungo la linea di vista fra noi e una sorgente lontana si trova una galassia o anche un ammasso di galassie, la luce della sorgente lontana viene deflessa più o meno intensamente proprio a causa della presenza di quella grande massa. Il risultato è che la sorgente lontana (un quasar, un galassia ecc.) viene osservata deformata e talvolta addirittura moltiplicata. La lente gravitazionale – appunto la massa della galassia o dell'ammasso di galassie lungo la linea di vista – può infatti deflettere in maniera diversa la luce a seconda della distribuzione della sua massa, potendo produrre anche immagini multiple della stessa sorgente lontana.

Fu l'astrofisico inglese Arthur Stanley Eddington (1882-1944) a condurre per primo l'esperimento sulla deflessione della luce durante l'eclisse solare del 1919. Qui a lato un negativo delle tante fotografie da lui realizzate durante l'evento



Un'altra importante conseguenza è la descrizione esatta della precessione del perielio di Mercurio, fenomeno solo parzialmente compreso nel contesto della teoria della gravitazione universale di Newton. Molti astronomi avevano elaborato calcoli di meccanica celeste nel tentativo di spiegare con precisione lo spostamento del punto di massimo avvicinamento al Sole del pianeta più interno del Sistema Solare. Tuttavia, anche prendendo in considerazione le perturbazioni esercitate su Mercurio da parte degli altri pianeti e da eventuali deformazioni dalla forma sferica del Sole stesso, restava un'apprezzabile differenza fra le previsioni teoriche e le misure sperimentali, discrepanza che è invece brillantemente eliminata utilizzando la teoria della relatività generale.

Fra le conseguenze più clamorose

Smithsonian Institution from United States/Eddington, ESA/LISA

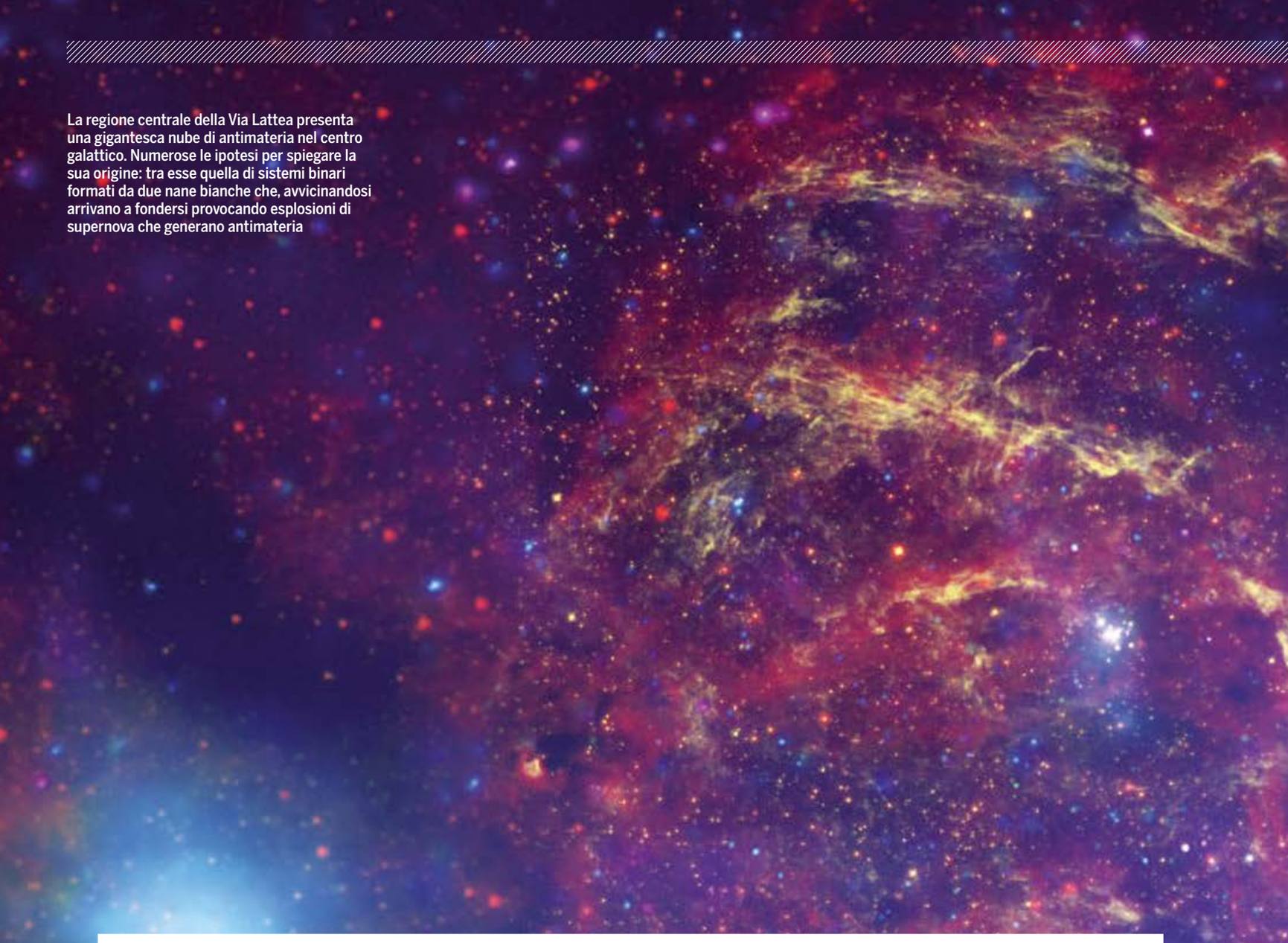
IL RAGGIO DELL'UNIVERSO È DI CIRCA 47 MILIARDI DI ANNI LUCE, CHE È COME DIRE 445 BILIONI DI MILIARDI DI CHILOMETRI

la luce delle sorgenti più lontane partita quasi 14 miliardi di anni fa, ma, in virtù del moto di espansione, in questi 14 miliardi di anni quelle sorgenti si sono allontanate fino a raggiungere appunto una distanza di 47 miliardi di anni luce. Quindi noi stiamo osservando oggetti celesti che prima erano molto più vicini, ma che ora sono considerevolmente più lontani rispetto a quanto sarebbero se vivessimo in un Universo statico. Nel caso di un Universo statico – non in espansione, quindi – si troverebbero infatti a una distanza pari a 13,8 miliardi di anni luce, che, in assenza del moto di espansione, sarebbe appunto la semplice distanza percorsa dalla luce nell'arco di vita dell'Universo.
Non si può invece affermare niente delle dimensioni totali dell'Universo assoluto, ovvero quello che ci si può immaginare comprenda l'Universo osservabile, ma che purtroppo non può essere conoscibile, in quanto escluso dalle nostre osservazioni proprio dalla limitatezza della velocità della luce. ■

supportate da misure sperimentali, occorre citare il rallentamento degli orologi ad opera di campi gravitazionali, risultato che la teoria della relatività generale prevede come conseguenza dell'alterazione della geometria spazio-temporale dovuta alla presenza di corpi massicci. In pratica, si osserva che gli orologi posti in un campo gravitazionale scandiscono il tempo in maniera diversa a seconda della loro posizione nel campo: in particolare, maggiore è l'intensità del campo (per esempio sulla superficie terrestre, al livello del mare, ovvero più vicino alla sorgente del campo), più lenta è la scansione. Viceversa, un orologio posto in quota (e quindi più lontano dalla sorgente) marcia più rapidamente. L'effetto si fa tanto più significativo quanto più intenso è il campo: sul nostro pianeta è quindi molto minore di quello che si osserverebbe su una stella o, ancora meglio, attorno a un oggetto denso e compatto come una nana bianca, una stella di neutroni o addirittura un buco nero.
Un altro effetto importante, anch'esso previsto dalla teoria della relatività generale, è la variazione di energia dei fotoni soggetti all'azione di un campo gravitazionale. In particolare, un fotone che si muove nel verso opposto a quello del campo gravitazionale perde energia, diminuendo la propria frequenza, che si sposta verso la parte rossa dello spettro elettromagnetico.
Tale fenomeno prende il nome di "redshift gravitazionale". In base ad esso, dunque, un fotone, sparato verso l'alto con una certa frequenza, arriva in quota con una frequenza minore perché perde energia, dovendo compiere lavoro contro il campo gravitazionale, in altre parole, il fotone dovendo andare in salita arriva "stanco".
Altre due importanti conseguenze della teoria sono l'esistenza dei buchi neri e l'emissione di onde gravitazionali da parte di corpi massicci accelerati.

Ilustrazione del quasar più distante finora individuato, prezioso strumento per lo studio dell'Universo primordiale

ESO M. Kornmesser



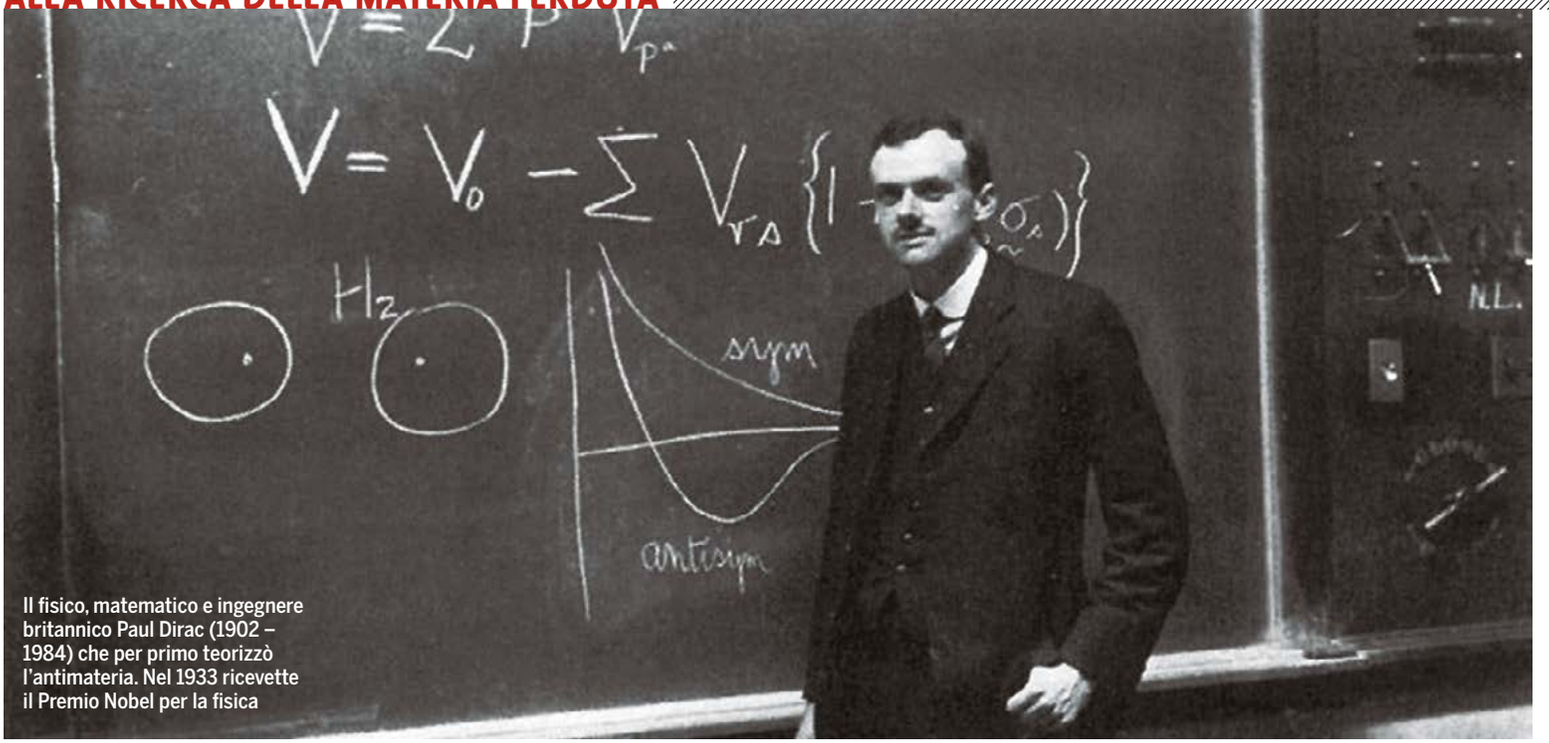
La regione centrale della Via Lattea presenta una gigantesca nube di antimateria nel centro galattico. Numerose le ipotesi per spiegare la sua origine: tra esse quella di sistemi binari formati da due nane bianche che, avvicinandosi arrivano a fondersi provocando esplosioni di supernova che generano antimateria

NASA JPL Caltech ESA CXC STScI

ALLA RICERCA DELLA MATERIA PERDUTA

Il Big Bang ha originato uguali quantità di materia e antimateria, ma dopo pochi istanti un forte squilibrio si è creato a favore della prima. Che cosa è successo all'antimateria? Capire i motivi di questa sproporzione è una delle sfide più impegnative della fisica contemporanea

Il cosmo è costituito essenzialmente di materia. Ma i fisici sanno che esiste anche l'antimateria, costituita da particelle con caratteristiche speculari rispetto alle loro controparti di materia. Così, per esempio, un antielettrone (detto anche positone o positrone) ha carica elettrica esattamente identica a quella dell'elettrone, ma di segno opposto. Tuttavia, pochi istanti dopo il Big Bang, una serie di complessi processi fisici ha praticamente portato alla scomparsa dell'antimateria esistente originariamente in misura pari alla materia: tale fenomeno è noto come asimmetria cosmica fra materia e antimateria.



Il fisico, matematico e ingegnere britannico Paul Dirac (1902 – 1984) che per primo teorizzò l'antimateria. Nel 1933 ricevette il Premio Nobel per la fisica

PREVISIONE TEORICA E RILEVAZIONE SPERIMENTALE

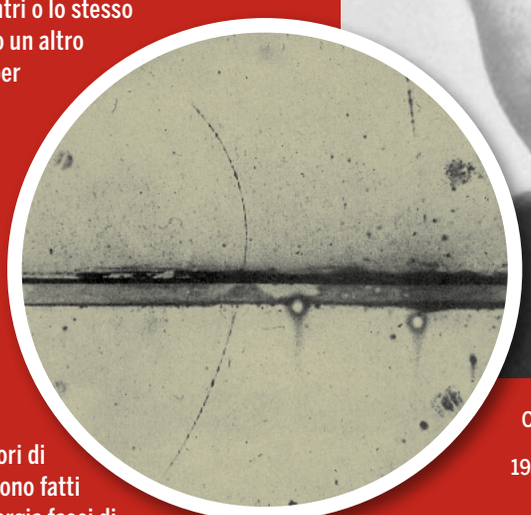
L'esistenza dell'antimateria venne prevista teoricamente nel 1928 dal fisico inglese Paul Adrien Maurice Dirac nell'ambito della sua teoria quantistica relativistica, ma la rilevazione sperimentale si ebbe solo alcuni anni dopo, nel 1932, da parte del fisico statunitense Carl David Anderson, che scoprì appunto il positrone nei raggi cosmici.

Ma come fanno i fisici e gli astronomi a osservare l'antimateria? Naturalmente studiando come questa interagisce con la materia ordinaria. Ebbene, i processi fisici che coinvolgono l'antimateria e, in particolare, l'interazione fra questa e la materia, sono essenzialmente due: l'annichilazione e la creazione di coppie.

Il primo fenomeno consiste nella completa trasformazione di due particelle di massa non nulla - una di materia, l'altra di antimateria - in energia, sotto forma di quanti del campo associato alla loro interazione. Per esempio, un elettrone e un antielettrone annichilano trasformandosi tipicamente in due fotoni, perché il fotone è la particella mediatrice dell'interazione elettromagnetica che agisce appunto sulle particelle cariche come gli elettroni. Per il principio di conservazione dell'energia, l'energia totale dei due fotoni deve essere esattamente equivalente alla massa totale delle due particelle, secondo la nota equazione di Einstein $E=mc^2$.

Il processo inverso è la creazione di coppie, ovvero la "materializzazione" di quanti del campo in corrispondenti particelle di materia e antimateria. Perché ciò avvenga, sempre per rispettare il principio di conservazione dell'energia, il quanto che si materializza deve avere un'energia minima pari a due volte l'equivalente in energia della massa della particella che si materializza, proprio perché le particelle da materializzare sono due. In genere, a innescare un processo del genere, come appunto la creazione di una coppia elettrone-positrone, è l'interazione di un fotone gamma, ovvero di un fotone particolarmente energetico, con un nucleo atomico. Naturalmente, una volta creata, l'antiparticella della coppia ha vita breve: è infatti sufficiente che incontri o lo stesso "partner di coppia" o un altro della stessa specie per andare soggetta nuovamente ad annichilazione.

Le ricerche sull'antimateria vengono condotte perlopiù in attrezzati laboratori dove è possibile produrla artificialmente. Così grazie agli acceleratori di particelle, dove vengono fatti scontrare ad alta energia fasci di



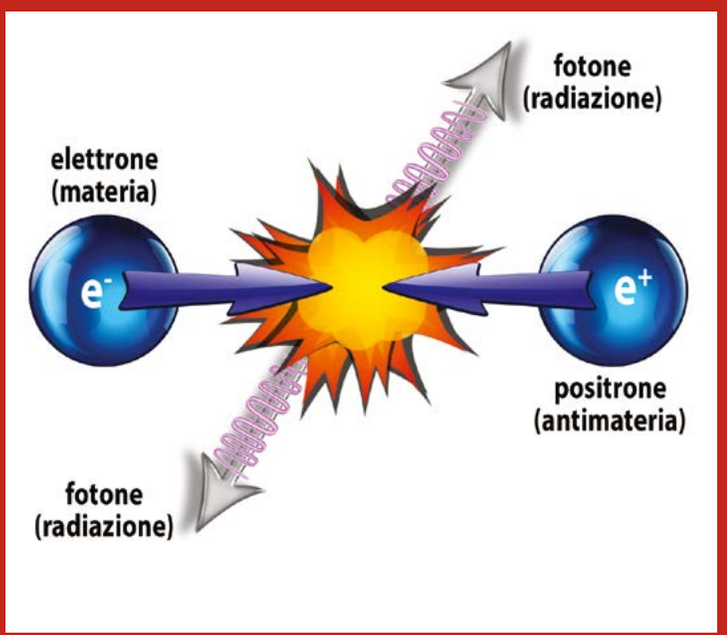
Carl David Anderson (1905-1991), Premio Nobel per la Fisica nel 1936 per la scoperta del positrone. A lato, la fotografia del primo positrone osservato

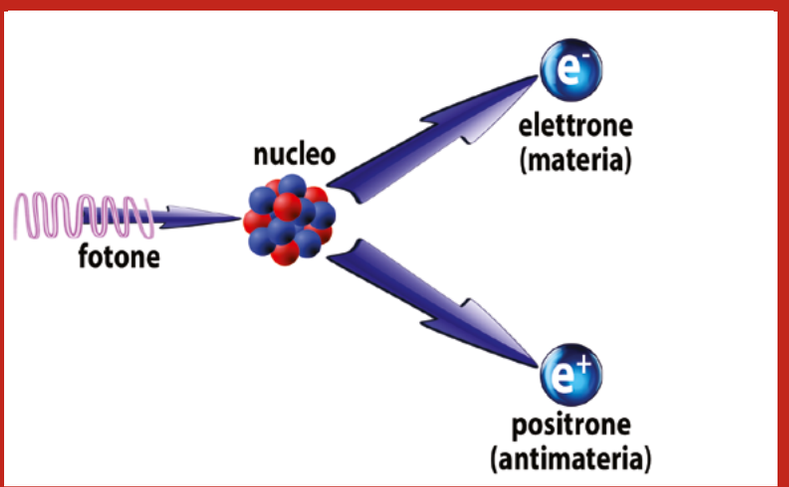
Commons/Dirac, Carl D. Anderson, American Physical Society/positrone, Nobel foundation/Anderson

LA RILEVAZIONE SPERIMENTALE DELL'ANTIMATERIA FU OPERA DI ANDERSON, CHE SCOPRÌ IL POSITRONE NEI RAGGI COSMICI

Questa asimmetria, ovvero la netta predominanza della materia rispetto all'antimateria, è uno dei tanti problemi a cui devono fornire adeguata risposta le teorie sull'Universo primordiale. Esperimenti a terra e osservazioni dallo spazio evidenziano comunque che questa asimmetria è almeno in parte dovuta al particolare comportamento di alcuni tipi di decadimenti naturali di particelle, che preferiscono prendere la strada che porta alla produzione di materia piuttosto che quella che produce antimateria. In fisica il decadimento è quel processo che porta alla trasformazione di una particella elementare o di un nucleo atomico in un elemento diverso con differenti caratteristiche energetiche. Decadimenti sono, per esempio, quelli del nucleo di uranio radioattivo che decade in due nuclei più leggeri, o quello del neutrone isolato, che dopo circa un quarto d'ora decade in un protone, un elettrone e un antineutrino. Nel contesto che stiamo affrontando è noto da tempo che, nel decadimento dei mesoni K neutri la simmetria fra materia e antimateria viene violata (i mesoni sono una famiglia di particelle subatomiche instabili composte da un quark e da un antiquark, naturalmente non dello stesso tipo, altrimenti annichilerebbero istantaneamente). In particolare, le misure effettuate indicano che un mesone K neutro decade in uno stato di due pioni più frequentemente di quanto non faccia la sua antiparticella, l'antimesone K neutro. La differenza è di soli cinque decadimenti su un milione, ma alla fine, se noi esistiamo e l'Universo non è

particelle con fasci di antiparticelle. è stato possibile approfondire la nostra conoscenza di questo tipo speculare di materia; al CERN, l'Organizzazione europea per la ricerca nucleare, gli scienziati sono riusciti a creare anche atomi di anti-idrogeno. L'antimateria si trova, però, anche in natura, nei raggi cosmici e in altri fenomeni di alta energia. Il decadimento naturale del neutrone produce un protone, un elettrone e un antineutrino di tipo elettronico, per esempio. Ancora, nella nostra Galassia, in particolare verso il suo centro, si osserva l'emissione di raggi gamma con l'energia tipica dei processi di annichilazione di elettroni e antielettroni, questi ultimi prodotti tipicamente dai decadimenti radioattivi di elementi pesanti. Sia il processo di annichilazione che quello di creazione di coppie sono pertanto osservati in natura in sorgenti astrofisiche particolarmente energetiche – esplosioni di supernove, pulsar, dischi di accrescimento di materia attorno a buchi neri supermassicci (nuclei galattici attivi e non) – proprio in virtù del fatto che l'emissione di fotoni ad altissima energia (raggi gamma) può essere accompagnata dalla creazione di coppie particella-antiparticella e dalla conseguente annichilazione di queste ultime con altre particelle della stessa specie. Anche sul nostro pianeta siamo costantemente bombardati da particelle di antimateria provenienti dai raggi cosmici.





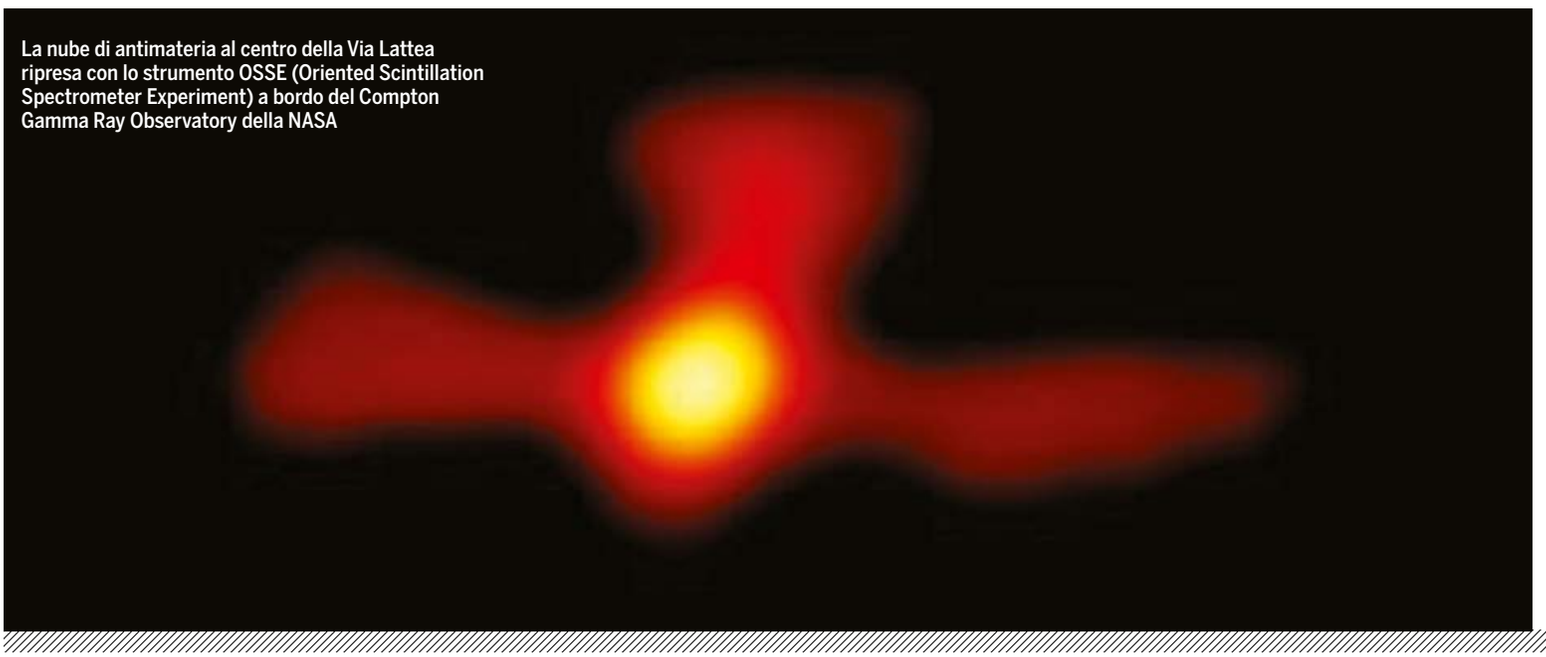
A sinistra, il processo dell'annichilazione. Quando una particella di antimateria viene a contatto con la corrispondente particella di materia, entrambe le particelle spariscono e tutta l'energia della coppia viene rilasciata sotto forma di radiazione
Qui sopra, il processo di produzione di coppia. Il fotone interagendo con un nucleo atomico converte la sua energia in materia e antimateria

Lungo 27 km e situato a 100 metri sotto terra, il tunnel dell'acceleratore di particelle LHC (Large Hadron Collider) del CERN di Ginevra conduce pionieristici esperimenti nell'ambito della fisica delle particelle

solo un enorme calderone di fotoni privo di qualunque forma di materia, possiamo forse ringraziare questa violazione di simmetria! I fisici hanno poi scoperto altri decadimenti naturali che portano a uno sbilanciamento fra la produzione di materia e di antimateria. Ma, almeno dal punto di vista teorico, questi meccanismi non sembrano sufficienti a giustificare la totale scomparsa dell'antimateria nell'Universo negli istanti immediatamente successivi al Big Bang. Il problema dell'asimmetria resta uno dei principali interrogativi della cosmologia, e si ipotizza sia addirittura necessario lo sviluppo di nuova fisica per arrivare a spiegarlo, dal momento che le teorie attuali non sembrano essere in grado di venirne a capo.

IPOTETICHE GALASSIE DI ANTIMATERIA

Una possibile spiegazione potrebbe essere l'esistenza nel nostro Universo di "isole di antimateria" o anche di intere galassie di antimateria, eventualmente composte dall'antimateria allontanatasi rapidamente dalla materia durante la fase di espansione esponenziale dell'Universo nota come inflazione.



La nube di antimateria al centro della Via Lattea ripresa con lo strumento OSSE (Oriented Scintillation Spectrometer Experiment) a bordo del Compton Gamma Ray Observatory della NASA

NASA, ESA, NRAO/AUI/NSF e G. Dubner

L'ANTIMATERIA PUÒ ESSERE PRODOTTA IN LABORATORIO GRAZIE AGLI ACCELERATORI DI PARTICELLE MA SI TROVA ANCHE IN NATURA

La Nebulosa Granchio, un resto di supernova nella costellazione del Toro, ripresa assemblando dati provenienti da cinque telescopi che coprono quasi tutta la larghezza dello spettro elettromagnetico: il Karl G. Jansky VLA, il telescopio spaziale Spitzer, l'HST, l'XMM-Newton e l'osservatorio a raggi X Chandra

W. Purcell (NWU) et al., OSSE, Compton Observatory, NASA

LA STRAORDINARIA ENERGIA E VELOCITÀ DEI RAGGI COSMICI

Dal cielo non arriva soltanto la luce delle stelle, ma anche un continuo flusso di particelle di materia, che colpisce il nostro pianeta da ogni direzione: i raggi cosmici. Questi sono essenzialmente composti da elettroni e protoni (ovvero nuclei di idrogeno), ma si trovano anche nuclei di elio e, in misura molto minore, di tutti gli elementi conosciuti. Sono perciò un altro "canale" – di tipo particellare, complementare quindi a quello della radiazione elettromagnetica – da cui è possibile raccogliere informazioni sull'Universo che ci circonda. I raggi cosmici sono le particelle di materia più veloci che si conoscano: basti pensare che alcuni di essi arrivano a velocità pari a 0,999999 volte la velocità della luce. Hanno origine sia dalla nostra Galassia, sia da sorgenti extragalattiche. Poiché sono dotati di carica elettrica, vengono accelerati e deviati sia dai campi magnetici interstellari presenti nella nostra Galassia, sia dal campo magnetico terrestre, quando appunto arrivano in prossimità del nostro pianeta: diventa perciò impossibile ricostruire la loro traiettoria e scoprire da dove provengono, ovvero individuare le sorgenti astrofisiche che li hanno emessi.

Si suppone però che essi (almeno quelli meno energetici) abbiano origine nei resti di supernova, nubi di materia in rapida espansione frutto di esplosioni di stelle massicce morenti. In particolare, un'esplosione di supernova – fase terminale dell'evoluzione di una stella di grande massa, che subisce il collasso gravitazionale una volta terminato tutto il combustibile nucleare a sua disposizione – è in grado di accelerare particelle e nuclei atomici portandoli a velocità, e quindi energie, molto elevate, confrontabili con quelle osservate nella maggior parte dei raggi cosmici.

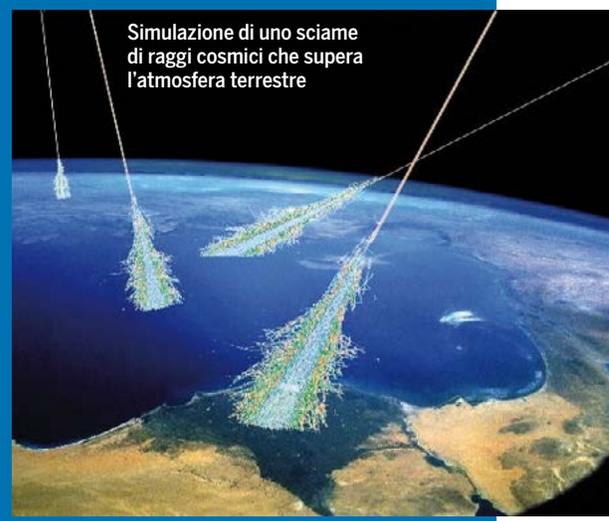
In effetti, i raggi cosmici coprono un ampio spettro di energie, potendo arrivare addirittura a valori attorno a cento miliardi di miliardi di elettronvolt (1020 eV), corrispondenti all'energia cinetica di una pallina da tennis che viaggia a cento chilometri orari. Si osserva però che il numero di raggi cosmici aumenta al diminuire dell'energia: in altre parole, i raggi cosmici meno energetici sono in quantità molto maggiore dei raggi cosmici a energie elevatissime, che si osservano molto raramente.

Quando un raggio cosmico arriva al nostro pianeta, urta una molecola di atmosfera e, in particolare, collide con uno dei nuclei di cui essa è composta. L'esito di queste collisioni, non troppo dissimili da quelle che avvengono all'interno degli acceleratori di particelle, è la produzione di un grandissimo numero di particelle, appunto, che danno origine a una pioggia – o doccia, dall'inglese "shower" –, anche nota come "sciame atmosferico". Alcune di queste interagiscono con altri nuclei oppure decadono spontaneamente, creandone altre, in un processo di moltiplicazione dello sciame. Molte altre, invece, riescono addirittura ad arrivare alla superficie terrestre: queste, che sono tipicamente elettroni, muoni, neutrini e fotoni, vengono definite raggi cosmici secondari, proprio per distinguerle dai raggi cosmici primari, che naturalmente sono quelli che arrivano a impattare la nostra atmosfera.

Le particelle che arrivano al suolo – rivelate con esperimenti di superficie o sotterranei – contribuiscono in maniera significativa alla radioattività naturale, causata dai nuclei radioattivi presenti nelle rocce della crosta terrestre, innalzandone il livello di oltre il 30 percento. La rivelazione e lo studio dei raggi cosmici primari vengono invece svolti con esperimenti effettuati fuori dall'atmosfera terrestre (per esempio su satellite), in modo da catturarli prima che interagiscano con l'atmosfera. Occorre infine citare il fatto che anche il Sole è un'importante sorgente di radiazione particellare, detta "vento solare", anch'essa composta essenzialmente da protoni ed elettroni.

Queste particelle, tipicamente molto meno energetiche dei raggi cosmici, vengono convogliate dalle linee del campo magnetico terrestre verso i poli magnetici.

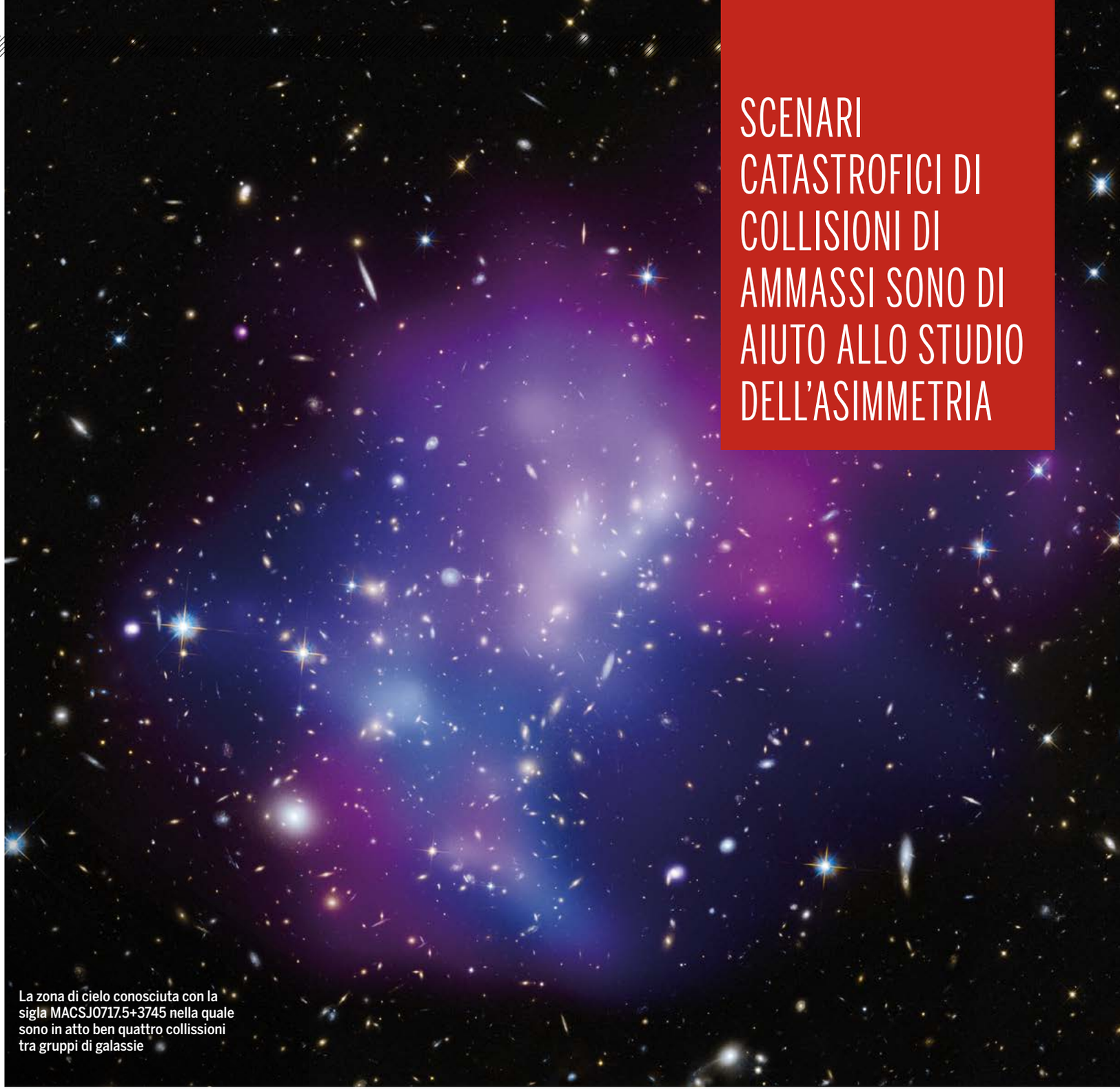
È appunto il loro ingresso in atmosfera, con la conseguente interazione con le molecole d'aria, a produrre il suggestivo fenomeno delle aurore polari.



Simulazione di uno sciame di raggi cosmici che supera l'atmosfera terrestre

Una spettacolare aurora polare ripresa a Lyngenfjorden in Norvegia

Simon Swordy NASA/raggi cosmici . Soerfm opera propria Wikimedia Commons/aurora



SCENARI CATASTROFICI DI COLLISIONI DI AMMASSI SONO DI AIUTO ALLO STUDIO DELL'ASIMMETRIA

La zona di cielo conosciuta con la sigla MACSJ0717.5+3745 nella quale sono in atto ben quattro collissioni tra gruppi di galassie

È interessante notare come l'instabilità dell'antimateria sia un fatto teorico convenzionale. Nel vuoto, infatti, le antiparticelle sono altrettanto stabili delle rispettive particelle. Purtroppo, proprio per questo motivo, una galassia isolata di antimateria sarebbe totalmente indistinguibile da una di materia. Ma se una galassia di antimateria incontrasse una nube di materia, o addirittura un'intera galassia, allora l'energia prodotta dalle annichilazioni ci renderebbe evidente la natura "speculare" delle due galassie. Sulla base di questa considerazione alcuni astronomi sono già da tempo alla ricerca di queste ipotetiche galassie di antimateria indagando con sofisticati telescopi per raggi gamma che oggi la tecnologia mette a disposizione.
La ricerca è affascinate: si va a caccia di annichilazioni nelle collisioni fra ammassi di galassie. Se uno di questi ammassi fosse costituito di antimateria, la materia dell'altro annichilirebbe con una violenta produzione di radiazione elettromagnetica ad alta energia (raggi gamma, appunto). Attualmente non esiste, però, alcuna prova sperimentale a supporto di questa ipotesi. Anche per questo motivo, i misteri legati all'asimmetria cosmica fra materia e antimateria si infittiscono e gli interrogativi rimangono nell'elenco di quelli che tuttora devono essere ancora risolti richiedendo ad astronomi, fisici e cosmologi impegnative ricerche. ■

NASA, ESA, CXC, C. Ma, H. Ebeling e E. Barrett et al. e STScI

La distribuzione della materia oscura (in blu)e del gas caldo (in verde) nel nucleo dell'ammasso Abell 520, formatosi da una violenta collisione di gruppi di galassie

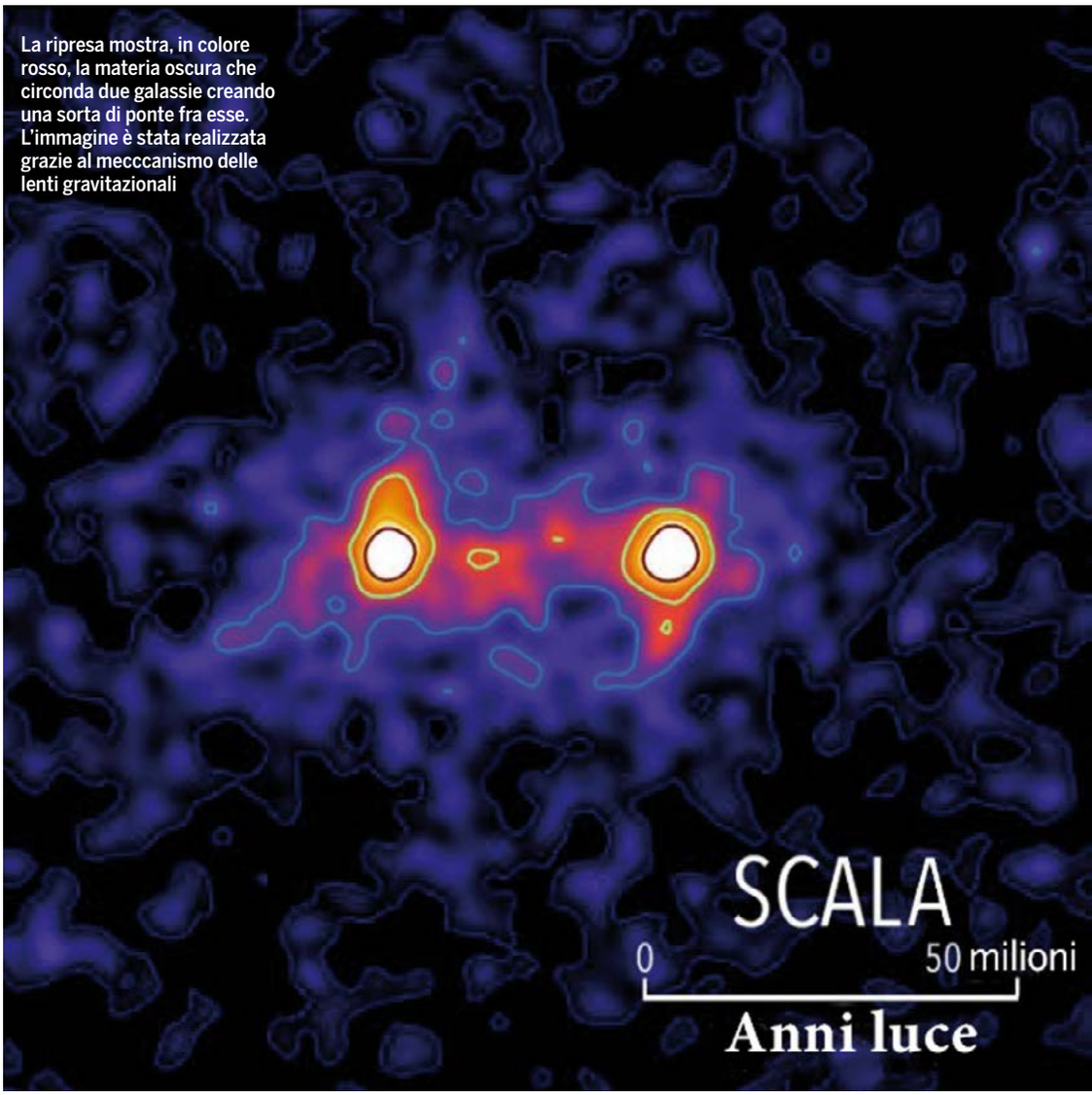
ESISTE LA MATERIA OSCURA?

Occupa il 27 per cento dell'Universo, ma non è direttamente osservabile. È possibile riconoscere le tracce della sua distribuzione e della sua esistenza, ma non esistono evidenze sperimentali certe

Gli astrofisici e i cosmologi da tempo invocano l'esistenza di una materia di cui si sentono gli effetti gravitazionali, ma che purtroppo sfugge alle osservazioni. Questa misteriosa "entità", denominata non a caso "materia oscura", è infatti fondamentale per spiegare i moti di rotazione delle galassie, la dinamica degli ammassi, ma anche l'evoluzione dell'Universo dal Big Bang a oggi. Fra i modi per evidenziare la presenza della materia oscura – e mapparne la distribuzione nello spazio – ci sono le lenti gravitazionali, la cui esistenza è prevista dalla teoria della relatività generale. Una lente gravitazionale non è altro che una galassia o un ammasso di galassie che deflette la radiazione proveniente da sorgenti lontane situate approssimativamente lungo la stessa linea di vista. Le lenti gravitazionali possono distorcere, focalizzare, separare i fasci di luce esattamente alla stessa maniera delle normali

NASA, ESA, CFHT, CXO, M. Jeee A. Mahdavi

lenti ottiche (da cui il nome). L'entità della deflessione dipende dalla massa deflettente, come deducibile dalla teoria della relatività generale, secondo cui anche i fotoni, seppure privi di massa, vengono deviati dal loro cammino dalla presenza di una massa che incurva lo spazio-tempo. L'effetto di lente gravitazionale permette così agli astrofisici sia di vedere ingrandite galassie altrimenti troppo distanti, sia di calcolare con buona precisione la massa complessiva (compresa quella oscura) dell'oggetto deflettente, in quanto l'entità della deflessione è in funzione della massa del corpo che funge da lente gravitazionale. E la deflessione osservata è sempre maggiore di quella che si avrebbe se la massa deflettente fosse solo quella luminosa e quindi visibile (stelle e gas). Ma il problema della materia oscura nacque con lo studio della curva di rotazione della nostra Galassia. Vediamo di che cosa si tratta.



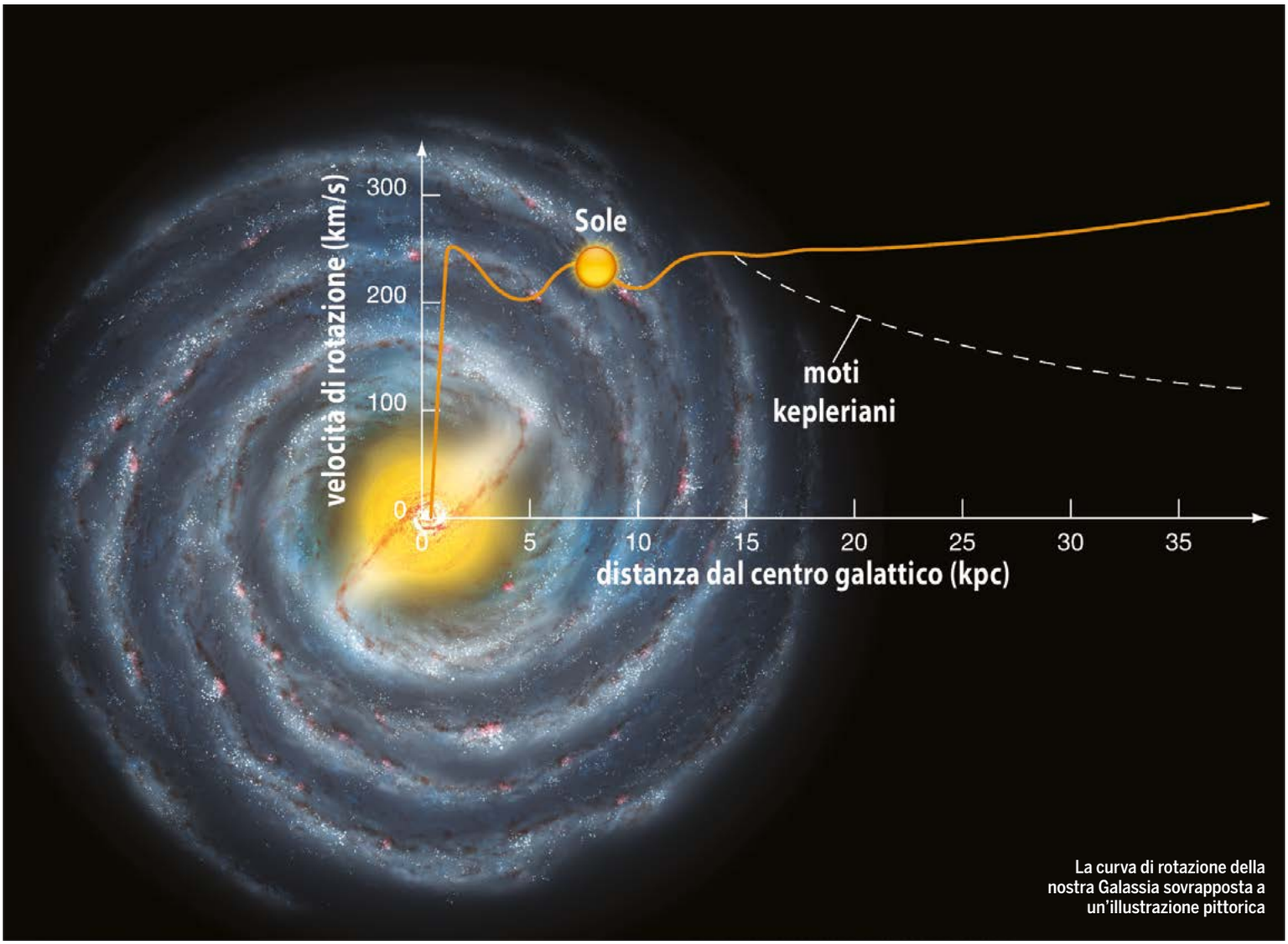
La ripresa mostra, in colore rosso, la materia oscura che circonda due galassie creando una sorta di ponte fra esse. L'immagine è stata realizzata grazie al mecccanismo delle lenti gravitazionali

LA VIA LATTEA E L'ENIGMA DELLE VELOCITÀ ORBITALI

La nostra Galassia è un sistema gravitazionalmente legato, per cui è in linea di principio possibile determinarne almeno approssimativamente la massa studiandone la cinematica, ovvero il moto delle singole stelle che la compongono. Conoscendo infatti le traiettorie orbitali delle stelle attorno al centro della Galassia e le velocità con le quali queste vengono percorse, è sempre possibile dedurre la massa dell'oggetto centrale attorno a cui orbitano. Nel caso delle orbite galattiche, le masse coinvolte sono infatti la massa della singola stella di cui si studia l'orbita e la massa complessiva di quella parte di Galassia compresa all'interno dell'orbita studiata, per cui la prima è sempre assolutamente trascurabile rispetto alla seconda.
In particolare, si può determinare la distribuzione di massa della Galassia andando a studiare le velocità orbitali di stelle (ma anche di nubi di gas) poste a distanze diverse dal centro stesso.
Proprio misurando velocità e distanze di stelle e nubi di gas del disco galattico, è stata costruita la curva di rotazione della Galassia, cioè il diagramma che confronta le velocità orbitali delle stelle con le loro distanze dal centro galattico.
La curva di rotazione è lo strumento fondamentale per determinare la massa di una galassia, poiché da essa è possibile dedurre la quantità di massa compresa all'interno di un certo volume di raggio dato. Inoltre, la distribuzione delle velocità all'aumentare della distanza dal centro ci consente di comprendere come questa massa è distribuita all'interno della Galassia.
Allontanandoci dal centro galattico, noi "vediamo" diminuire nitidamente la densità di stelle (e quindi di materia "luminosa"), per cui ci aspetteremmo che anche la massa compresa entro una certa distanza non debba più aumentare, esattamente come accade per il Sistema Solare, dove la massa è essenzialmente tutta concentrata nel Sole.
In altre parole, le velocità orbitali delle stelle del disco dovrebbero diminuire all'aumentare della distanza, come accade appunto nel caso di orbite

OSSERVANDO LA CURVA DI ROTAZIONE DELLA NOSTRA GALASSIA CI SI RESE CONTO DELLA PRESENZA DI MATERIA INVISIBILE

S. Epps & M. Hudson University of Waterloo

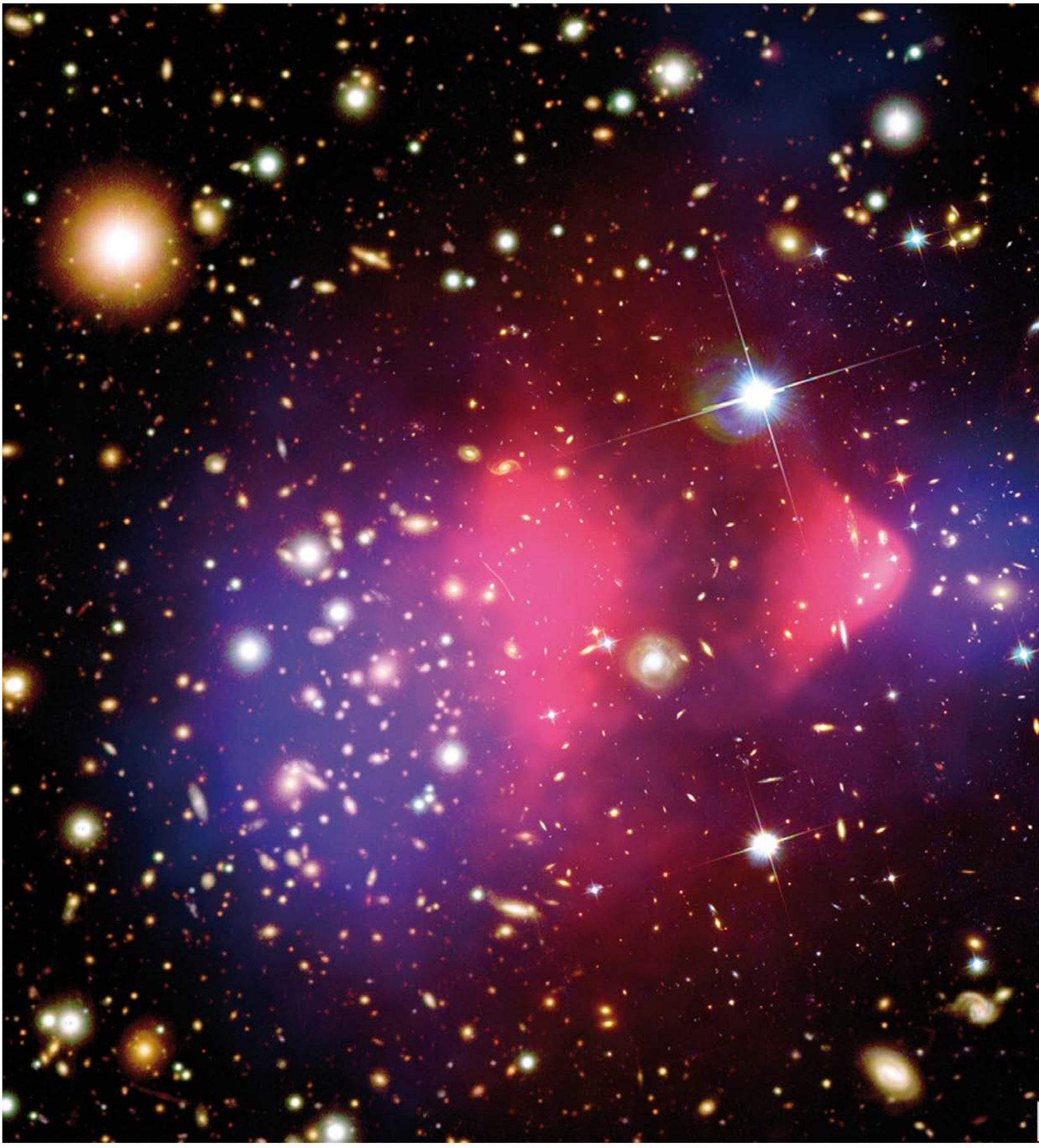


La curva di rotazione della nostra Galassia sovrapposta a un'illustrazione pittorica

Questa immagine realizzata dal Telescopio Spaziale Hubble mostra la distribuzione della materia oscura (in colore azzurro più o meno intenso) al centro dell'ammasso Abell 1689, nella costellazione della Vergine, contenente circa 1.000 galassie

kepleriane. L'aspetto caratteristico della curva di rotazione galattica dimostra invece che, anche a grandissime distanze dal centro galattico, le velocità orbitali sono molto elevate, tanto da far supporre che la forza di gravità, invece di diminuire allontanandosi dalla "materia luminosa", aumenti, ovvero che vi sia un'ulteriore quantità di massa, invisibile, a rendere ragione di questo incremento altrimenti inspiegabile della forza gravitazionale generata dalla massa galattica: in pratica, senza questa ulteriore massa, nota per questa sua "invisibilità" con il nome di massa oscura (talvolta erroneamente definita anche massa mancante: in realtà la massa c'è, solo che noi non la vediamo!), la nostra Galassia ruoterebbe troppo velocemente per poter essere considerata un sistema gravitazionalmente legato.

R. Hurt (SSC), JPL-Caltech, NASA, D. Coe NASA ESA JPL, California Institute of Technology e Space Telescope Science Institute, N. Benítez, T. Broadhurst, H. Ford



L'ammasso MACS 1E 0657-558 in un'immagine composita realizzata con riprese del Telescopio Spaziale Hubble, del Chandra X-ray Observatory e del telescopio Magellan. Il colore rosso indica i raggi X emessi dal gas caldo, il blu la distribuzione della materia oscura

NASA/CXC/CfA/M. Markevitch et al. STScI ESO WFI Magellan D.Clowe et al.

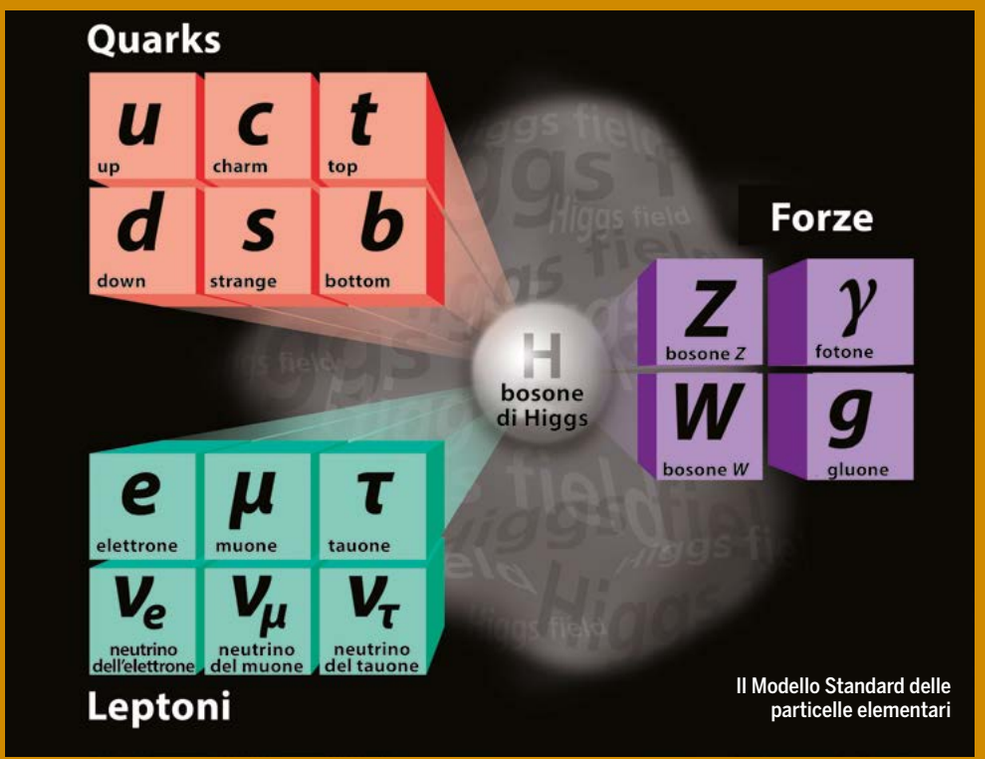
INTRIGANTI IPOTESI

Il problema della materia oscura nasce quindi per la prima volta dall'osservazione della curva di rotazione della nostra Galassia. Ma questo stesso problema si manifesta anche osservando tutte le altre galassie, e non solo, anche gli ammassi di galassie, la cui dinamica rivela la presenza di grandissime quantità di materia oscura.
In principio si potrebbe pensare che questa materia possa essere composta da stelle spente (nane bianche o stelle di neutroni ormai fredde) o mai nate (nane brune), da pianeti, da gas freddi, ovvero da oggetti la cui eventuale luce emessa è troppo debole per essere rivelata. Per gli oggetti massicci che dovrebbero popolare gli aloni delle galassie gli astronomi usano il termine MACHO (Massive Compact Halo Object). Nondimeno, tutti i tentativi fatti sinora per rivelare questo tipo di oggetti, composti da materia ordinaria, ma oscuri, hanno dato esiti negativi.
Un'ultima possibilità potrebbe essere quella dell'esistenza dei buchi neri primordiali, ma anche questa ipotesi

IL MODELLO STANDARD È LA TEORIA FISICA CONTEMPORANEA PIÙ ACCREDITATA

IL MODELLO STANDARD DELLE PARTICELLE ELEMENTARI

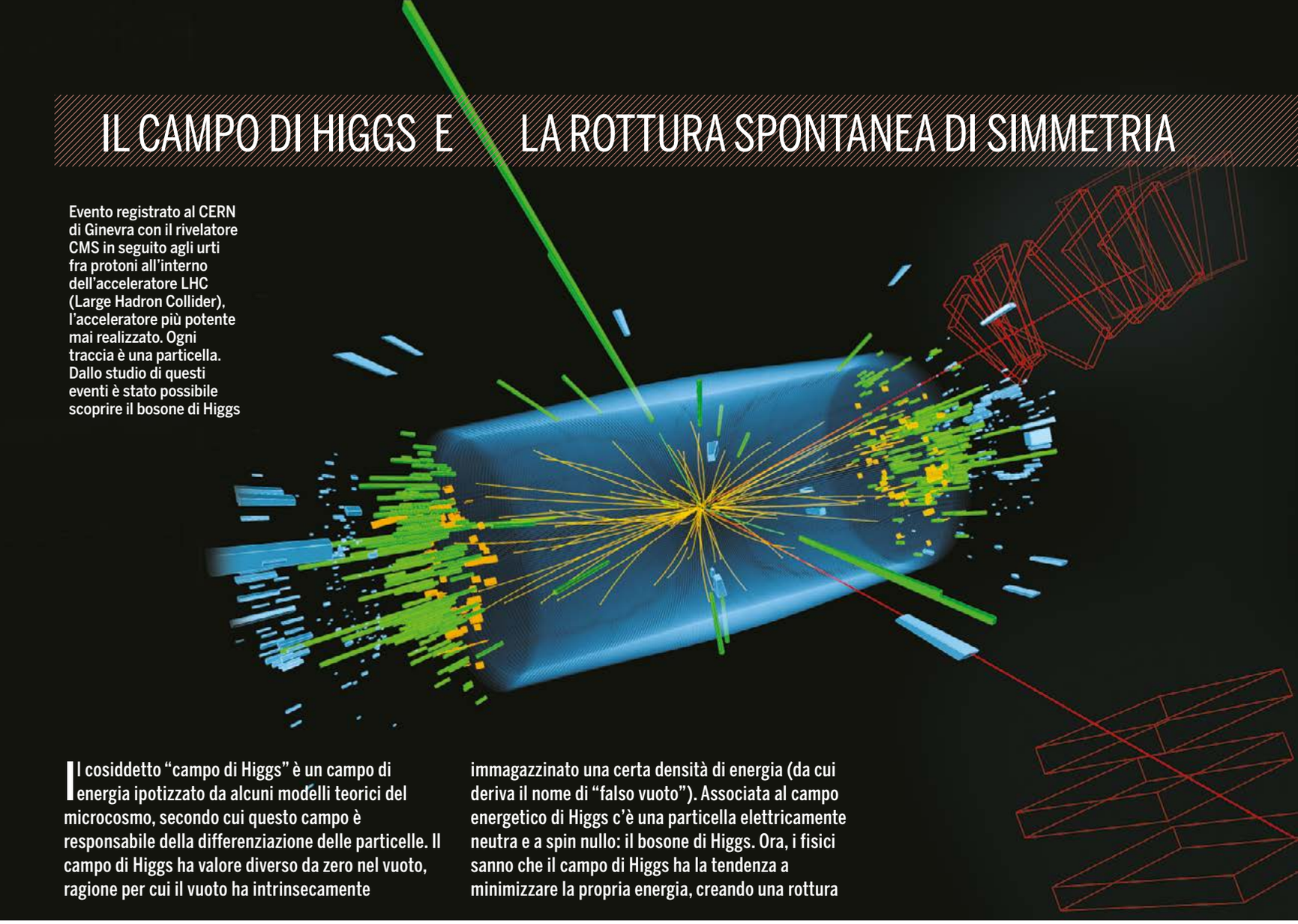
Secondo la fisica contemporanea, tutti i comportamenti della materia sono riconducibili all'azione di quattro interazioni fondamentali: la forza gravitazionale, la forza debole, la forza elettromagnetica e la forza forte. La forza debole e quella forte, scoperte solo nel XX secolo, hanno un raggio d'azione infinitesimo, cioè sono forze il cui raggio d'azione è paragonabile con le dimensioni nucleari. La forza di gravità non ha invece alcuna influenza a livello atomico e subatomico in quanto essa dipende dalle masse degli oggetti interagenti e queste ultime, nel caso delle particelle elementari, sono infinitesime. Secondo la teoria più accreditata, il cosiddetto Modello Standard delle particelle elementari, le particelle che oggi appaiono prive di struttura interna (e che pertanto possono dirsi elementari) vengono suddivise in due categorie: quark e leptoni. I leptoni sono caratterizzati dal fatto di non risentire dell'interazione forte.
All'interno di questa categoria sono stati identificati sei tipi diversi di particelle, chiamate "sapori" (il nome non ha ovviamente niente a che fare con la sensazione di gusto). Tre di questi leptoni – elettrone, muone e tauone – hanno carica elettrica identica (pari a –1), mentre differiscono per la massa. L'elettrone è il più leggero, la particella tau la più pesante. Gli altri tre, i neutrini, sono, come suggerisce il loro nome, elettricamente neutri. Per ogni leptone vi è un corrispondente antileptone. Le antiparticelle hanno la stessa massa delle rispettive particelle, ma hanno valori opposti di altre proprietà quali la carica elettrica. Nelle loro interazioni i leptoni appaiono divisi in tre famiglie (o generazioni), ciascuna composta da un leptone carico e dal corrispondente neutrino.
Sono inoltre stati identificati sei tipi di quark anch'essi chiamati sapori (i quark up, down, charm, strange, top e bottom). Sono proprio i quark i costituenti ultimi di protoni e neutroni: due "up" e un "down" costituiscono un protone, mentre due "down" e un "up" formano un neutrone. Una delle caratteristiche peculiari dei quark è quella di possedere una carica elettrica pari a una frazione esatta della carica dell'elettrone (carica elettrica frazionaria). Quark e leptoni sono pertanto i mattoni fondamentali della materia che ci circonda.
Ma secondo le moderne teorie quantistiche dei campi le quattro interazioni fondamentali vengono descritte come dovute allo scambio di una o più particelle mediatrici. La forza forte è quindi trasmessa dai gluoni (dall'inglese *glue*, colla), quella elettromagnetica dai fotoni e così via. Quark, leptoni e particelle mediatrici rappresentano così l'insieme fondamentale di particelle elementari su cui poggia la nostra descrizione dell'Universo. Oltre a queste, già tutte individuate – a eccezione del gravitone, l'ipotetica particella mediatrice dell'interazione gravitazionale – per mezzo di esperimenti effettuati con acceleratori di particelle, dopo anni di caccia, i fisici hanno finalmente trovato anche un'altra particella elementare prevista dal Modello Standard: il "bosone di Higgs" . Questa particella riveste in effetti particolare importanza nell'ambito della teoria: essa è infatti il "quanto" di un particolare campo, detto di Higgs, appunto, che, secondo la teoria, permea lo spazio vuoto ed è all'origine della massa di tutte le particelle.
In vari stadi della conoscenza della struttura della materia i fisici hanno pensato di aver identificato i mattoni fondamentali, le vere particelle elementari. Oggi tali elementi sembrano essere ridotti a quark e leptoni assieme alle particelle che mediano le forze. Ma chissà che in futuro anche questa visione non debba venire nuovamente modificata.



Il Modello Standard delle particelle elementari

Fermi National Accelerator Laboratory (Fermi Lab)

IL CAMPO DI HIGGS E LA ROTTURA SPONTANEA DI SIMMETRIA



Evento registrato al CERN di Ginevra con il rivelatore CMS in seguito agli urti fra protoni all'interno dell'acceleratore LHC (Large Hadron Collider), l'acceleratore più potente mai realizzato. Ogni traccia è una particella. Dallo studio di questi eventi è stato possibile scoprire il bosone di Higgs

Il cosiddetto "campo di Higgs" è un campo di energia ipotizzato da alcuni modelli teorici del microcosmo, secondo cui questo campo è responsabile della differenziazione delle particelle. Il campo di Higgs ha valore diverso da zero nel vuoto, ragione per cui il vuoto ha intrinsecamente immagazzinato una certa densità di energia (da cui deriva il nome di "falso vuoto"). Associata al campo energetico di Higgs c'è una particella elettricamente neutra e a spin nullo: il bosone di Higgs. Ora, i fisici sanno che il campo di Higgs ha la tendenza a minimizzare la propria energia, creando una rottura

UNA TEORIA ALTERNATIVA

La materia oscura è uno dei più grandi misteri dell'astronomia. Senza la sua forza gravitazionale, le galassie in rotazione volerebbero via, gli ammassi di galassie si disperderebbero e la struttura a grande scala dell'Universo sarebbe drasticamente diversa. Ma nessuno sa cosa sia e gli esperimenti di laboratorio non sono ancora riusciti a rivelarla. Esiste davvero, o le nostre idee sulla gravità potrebbero essere sbagliate? Il fisico Mordehai Milgrom (Weizmann Institute, Rehovot, Israele) ritiene che la seconda ipotesi sia quella giusta. E non è il solo. Nel 1981 Milgrom elaborò la "dinamica newtoniana modificata" (MOND - Modified Newtonian Dynamics), contenente l'idea radicale che il comportamento della gravità cambia su distanze di scala galattica. Nonostante i molti tentativi di screditare la teoria, essa è ancora viva e vegeta. Secondo la formulazione originaria di Newton, l'intensità della forza gravitazionale diminuisce con l'inverso del quadrato della distanza da una massa centrale. La dinamica newtoniana modificata cambia la legge di Newton dell'inverso del quadrato, affermando che quando la forza gravitazionale è inferiore a una certa soglia diventa inversamente proporzionale alla distanza, anziché al suo quadrato. La MOND riesce per esempio a spiegare molto bene il moto delle galassie senza invocare la materia oscura. Ma non è applicabile a scale di distanza limitate come quelle del Sistema Solare: l'intensità gravitazionale a cui iniziano a evidenziarsi gli effetti della MOND è così esigua che essi influenzerebbero le orbite planetarie soltanto a migliaia di unità astronomiche dal Sole. Nonostante alcune difficoltà a far concordare teoria e osservazioni, la MOND ha rivelato un'ottima tenuta, tanto che l'unico modo per confutarla pare sia quello... di scoprire la materia oscura.

CMS/CERN, Bengt Nyman from Vaxholm, Sweden Commons/Higgs.

Il fisico britannico, Premio Nobel per la fisica nel 2013, Peter Higgs (1929)

spontanea di simmetria. È proprio grazie a questo fenomeno che le particelle con cui interagisce il bosone di Higgs acquistano massa. Un esempio è quanto accade nella teoria elettrodebole, che unifica l'elettromagnetismo e la forza nucleare debole, dove l'interazione fra il campo di Higgs e le particelle mediatrici dell'interazione porta tre di queste a diventare massicce, mentre l'unica particella a restare senza massa è il fotone, il quanto di luce. Questo processo è chiamato anche meccanismo di Higgs, e prende il nome dal fisico britannico Peter Higgs (1929), che per primo lo ipotizzò nel 1964.

Il modello standard delle particelle elementari prevede teoricamente l'esistenza del bosone di Higgs, e la sua conferma sperimentale è arrivata nel 2012, grazie agli esperimenti condotti con l'acceleratore LHC, presso il CERN di Ginevra. Le grandi teorie unificate (GUT) predicono molte particelle di Higgs, a masse troppo elevate per essere accessibili alla sperimentazione.

Il bosone di Higgs gioca un ruolo fondamentale nei processi di rottura spontanea di simmetria. Con l'espressione "rottura di simmetria" si indica, in cosmologia e in fisica delle particelle, un processo (spesso spontaneo) che conduce un sistema fisico da uno stato simmetrico a uno asimmetrico a minore energia.

In particolare, la rottura spontanea di simmetria consiste nella riduzione della quantità di simmetrie intrinseche di un sistema fisico, generalmente associata a una transizione di fase. Per esempio, in assenza di campo magnetico esterno, una bussola ha simmetria rotazionale e ha uguale probabilità di puntare in ogni direzione. Il campo magnetico terrestre rompe questa simmetria introducendo una direzione preferenziale verso cui punta la bussola.

Secondo alcuni modelli cosmologici, comprendenti le grandi teorie unificate, l'Universo primordiale era molto più simmetrico di quello attuale: il raffreddamento causato dall'espansione ha fatto sì che alcune simmetrie venissero rotte spontaneamente in modo permanente.

LA MATERIA OSCURA ADDIZIONATA ALL'ENERGIA OSCURA OCCUPA IL 95% DEL NOSTRO UNIVERSO: UNA GRANDE SFIDA PER I COSMOLOGI

Il fisico israeliano Mordehai Milgrom fautore della teoria MOND - Modified Newtonian Dynamics

Euclid, missione ESA/NASA prevista per il 2020, dotata di un telescopio in grado di indagare le galassie di circa un terzo dell'intera volta celeste, offrirà un importante contributo all'indagine sulla materia oscura

è ancora tutta da verificare. Comunque, dallo studio della radiazione cosmica di fondo, in particolare, i cosmologi sanno che nell'Universo la quantità di materia ordinaria non può superare un certo limite, altrimenti l'Universo sarebbe completamente differente da quello attuale. Non resta allora che ipotizzare l'esistenza di un tipo di materia che si differenzia da quella ordinaria, materia esotica, le cui particelle – definite WIMP (Weakly Interacting Massive Particle, ovvero particelle massicce debolmente interagenti) – sarebbero ancora tutte da individuare. I principali candidati a rivestire il ruolo di particelle di materia oscura sono al momento neutralini e assioni, particelle ipotetiche previste da estensioni del Modello Standard delle particelle elementari. Ma anche in questo caso, nonostante i grandi sforzi tecnologici, di queste particelle non si ha ancora alcuna evidenza sperimentale.

In ogni caso, nonostante la natura della materia oscura sia ancora oggetto di dibattito, non è certamente messo in dubbio il suo effetto gravitazionale, così intenso, per la nostra Galassia, da rendere addirittura ragione del 90 per cento della massa che la costituisce. Ma, soprattutto, di materia oscura è composto il 27 per cento del nostro Universo, laddove la materia ordinaria ne copre appena il 5 per cento e il restante 68 per cento è costituito da energia oscura.

In altre parole, il 95 per cento della materia-energia di cui è composto l'Universo è di natura completamente sconosciuta. Una bella e intrigante sfida per i cosmologi! ■

ESA C. Carreau

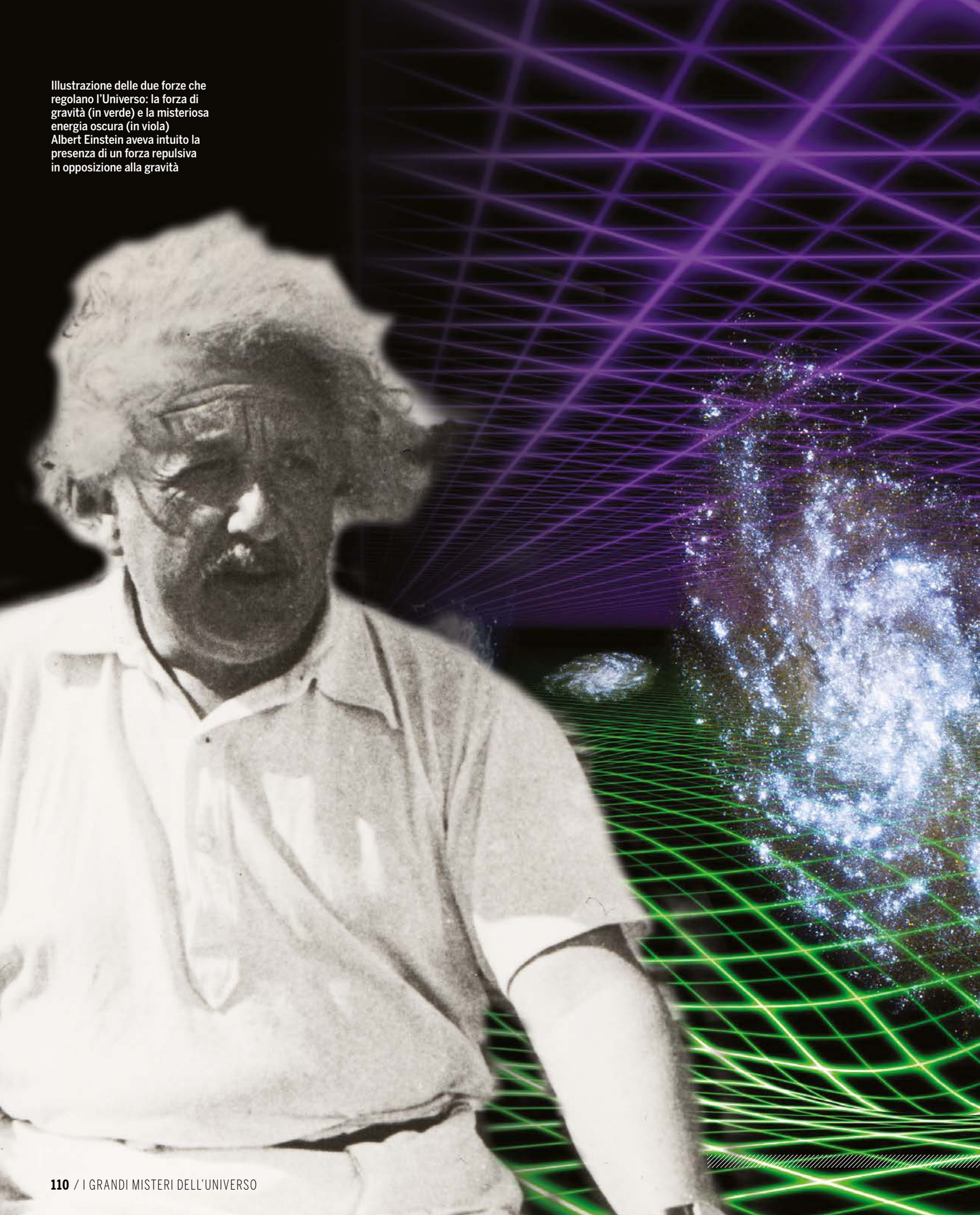


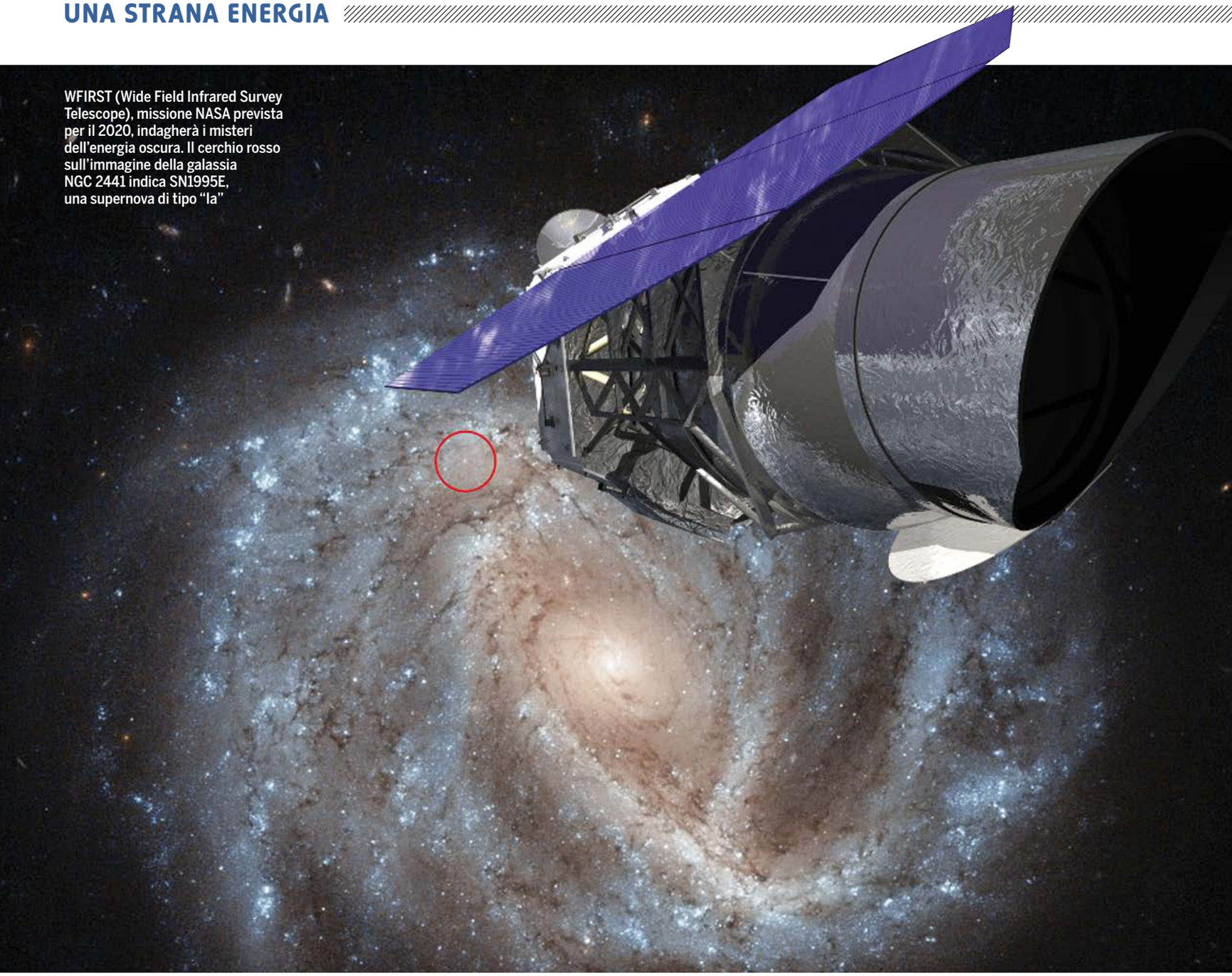
Illustrazione delle due forze che regolano l'Universo: la forza di gravità (in verde) e la misteriosa energia oscura (in viola) Albert Einstein aveva intuito la presenza di un forza repulsiva in opposizione alla gravità

UNA STRANA ENERGIA

La presenza di energia oscura è in accordo con la teoria del Big Bang e spiegherebbe perché l'espansione originata dal grande scoppio, anziché spegnersi, come si pensava, è in continua accelerazione. Ma gli scienziati non sono ancora riusciti a trovare la prova definitiva della sua esistenza

«Il mio più grande errore». Così Albert Einstein definì l'introduzione di un "termine cosmologico" repulsivo nel suo modello di Universo, elaborato applicando le equazioni della relatività generale. Quello che il grande fisico tedesco cercava era un fattore, una forza che si opponesse alla forza di gravità per spiegare l'apparente staticità di un Universo che, proprio sotto la spinta della gravità, avrebbe dovuto chiudersi su se stesso. Einstein abbandonò il "termine cosmologico" e con esso l'idea di un Universo statico di fronte all'evidenza sperimentale della sua espansione.

ETH-Bibliothek/Einstein/NASA/JPL-Caltech



WFIRST (Wide Field Infrared Survey Telescope), missione NASA prevista per il 2020, indagherà i misteri dell'energia oscura. Il cerchio rosso sull'immagine della galassia NGC 2441 indica SN1995E, una supernova di tipo "Ia"

ESA, NASA, HST, Nick Rose/NGC 2441

E invece, da circa venti anni, quell'errore è finito con l'apparire un'altra geniale intuizione. Il "nostro" Universo, quello che gli astronomi ci hanno descritto come figlio del Big Bang, torna ad aver bisogno di una forza repulsiva, una forza oscura che si opponga alla gravità. Ma questa antigravità non serve più a spiegare come mai l'Universo sia statico. Al contrario serve a dare ragione di un fenomeno insospettabile fino a venti anni fa: l'espansione originata dal Big Bang, anziché spegnersi un po' alla volta sotto l'effetto della gravità, diventa sempre più rapida. Proprio come se alla forza di partenza, quella del grande scoppio, se ne aggiungesse un'altra, che fa fuggire le galassie sempre più lontane l'una dall'altra e sempre più velocemente. Nel 1998 due gruppi internazionali di astronomi, il Supernova Cosmology Project e lo High-Z Supernovae Search Team, annunciarono i risultati delle osservazioni effettuate su numerosi campioni di supernove di tipo "Ia", dette candele standard, poste a distanze diverse. Distanze diverse significano anche età diverse, perché la luce impiega un certo tempo ad arrivare fino a noi. Quindi la luce che vediamo oggi provenire da una stella corrisponde alla luce emessa da quella stella un certo numero di anni fa: tanti quanti sono quelli impiegati per arrivare. Ebbene, la scoperta degli scienziati di entrambi i gruppi fu che il tasso di espansione dell'Universo non risultava rallentato, come ci saremmo aspettati se in campo ci fosse solo la forza di gravità, bensì accelerato. Che il tasso di espansione dell'Universo non fosse uniforme lo sapevamo, ma che, invece di diminuire come previsto dalla teoria, aumenti è una vera sorpresa. Inaspettatamente, infatti, l'Universo si starebbe espandendo sempre più velocemente. E non è tutto: i cosmologi hanno anche scoperto, sempre grazie alle supernove di tipo "Ia", che nei primi miliardi di vita dell'Universo l'espansione era ancora fortemente rallentata dalla forza di gravità.

LA SCOPERTA DELL'ENERGIA OSCURA

Il quadro complessivo è quindi quello di un Universo che fino a una certa epoca è stato dominato dalla gravità, ovvero è stato rallentato nella sua espansione, per passare poi a una fase di accelerazione del processo di espansione causata da una sorta di "antigravità" che i cosmologi hanno chiamato "energia oscura" e che avrebbe preso il sopravvento sulla normale forza attrattiva.
Per rendere conto di questo termine repulsivo, nelle equazioni che descrivono i modelli di Universo è stato necessario introdurre nuovamente il termine cosmologico di Einstein, adesso chiamato "costante cosmologica" o Lambda, in onore di Einstein che l'aveva appunto battezzato "fattore lambda".

Cosa sia in realtà questa energia oscura ancora nessuno lo sa: fluttuazioni del vuoto, insospettabile sorgente di energia, o qualcosa di totalmente nuovo ed inatteso. Certamente ci sarà ancora molto lavoro per i cosmologi. Perché al momento attuale di alternative valide alla costante cosmologica pare non ve ne siano. Tutte quelle proposte sinora sembrano infatti avere importanti controindicazioni. Mentre l'introduzione della costante cosmologica nelle equazioni toglierebbe invece molti dubbi ai cosmologi teorici e permetterebbe di spiegare le caratteristiche osservate della radiazione cosmica di fondo, secondo cui l'energia oscura rende conto del 68 per cento della quantità totale di materia-energia contenuta nel nostro Universo.

UN "ERRORE" GENIALE, QUELLO DI EINSTEIN: UN'ENERGIA OSCURA REPULSIVA ALLA GRAVITÀ SI ACCORDA AL MODELLO DEL BIG BANG

Il fisico statunitense Saul Perlmutter del Supernova Cosmology Project e, sullo sfondo, la supernova SN1987a

NASA, WFIRST Project/WFIRST, Supernova Cosmology Project/Perlmutter

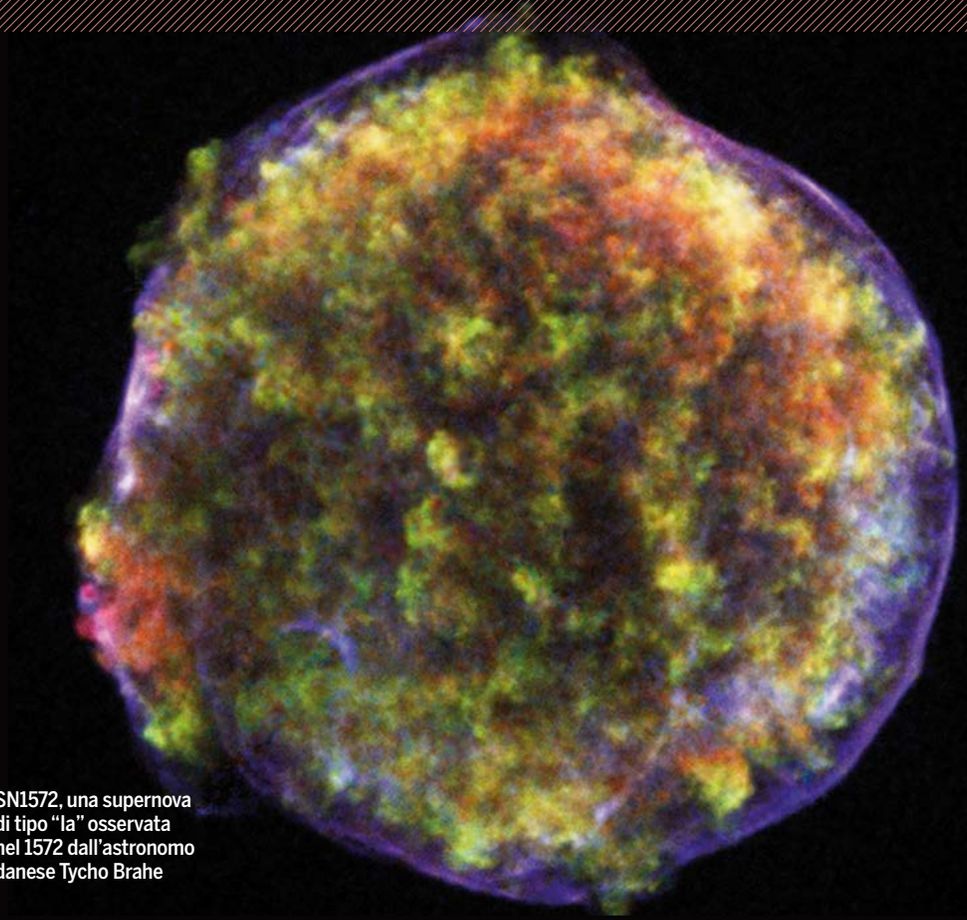
UN ENIGMA DIFFICILE DA RISOLVERE

Ma che forma assume questa energia oscura? Per l'energia oscura il compito non consiste infatti propriamente nel rivelarla, come si fa con le particelle di materia, ma nel definirla, ovvero nell'immaginare e nel comprendere come agisce. Se l'energia oscura non cambia nel tempo e nello spazio, si comporta come la costante cosmologica di Einstein; altrimenti potrebbe essere una cosiddetta quintessenza.
Entrambi i termini, come la stessa espressione "energia oscura", sono però dei segnaposto, delle semplici etichette che gli scienziati hanno adottato nell'attesa di capire la natura del fenomeno. La costante cosmologica di Einstein afferma che un dato volume di spazio debba contenere una certa quantità di energia, e che questa energia pervade l'Universo e rimane costante nel tempo. Mentre l'Universo si espande e il volume di spazio aumenta, l'effetto dell'energia oscura diventa sempre maggiore, portando a un'accelerazione. Ma secondo la teoria quantistica la densità di energia dello spazio dovrebbe avere un valore 10^{120} volte maggiore del 68 per cento stimato per la densità di energia dell'Universo. L'Universo primitivo si sarebbe espanso così rapidamente che la gravità non avrebbe mai potuto rallentare la materia per formare stelle e galassie. Quanto alla quintessenza, che deriva dall'antico nome di un ipotetico quinto elemento, si tratterebbe di un qualche tipo di campo dinamico finora sconosciuto alla fisica. In

Da sinistra, Saul Permutter, Brian P. Schmidt e Adam G. Riess, i tre scienziati Premio Nobel per la Fisica nel 2011 per la scoperta riguardante l'accelerazione dell'Universo attraverso lo studio delle supernove

CLASSIFICAZIONE DELLE SUPERNOVE

Una stella che esplode come supernova si manifesta con un improvviso e rapido aumento di luminosità che, una volta raggiunto un picco massimo, decresce lentamente nel tempo. Al massimo di luminosità una supernova compete in splendore con l'intera galassia che la ospita. Dalle osservazioni risulta che è possibile classificare le supernove in due classi distinte: tipo "I" e tipo "II". La differenziazione avviene tramite l'analisi spettrale: mentre le supernove di tipo "II" sono caratterizzate dalla presenza di intense righe dell'idrogeno, quelle di tipo "I" ne sono totalmente prive. Ma poiché l'idrogeno è l'elemento più abbondante dell'Universo, se non si rileva significa che gli oggetti che danno luogo a eventi del tipo "I" hanno perso il loro guscio di idrogeno nel corso dell'evoluzione precedente l'esplosione. Entrambi i tipi di supernova sono ulteriormente suddivisi in sottotipi. Le supernove di tipo "II" sono certamente prodotte dal collasso gravitazionale del nucleo di stelle massicce al termine della loro evoluzione. Le supernove di tipo "I"


SN1572, una supernova di tipo "Ia" osservata nel 1572 dall'astronomo danese Tycho Brahe

Holger Motzkau via Wikimedia Commons/Premi Nobel. ASA CXC Rutgers J. Warren. J. Hughes et al./SN 1572

La galassia UGC 9391 offre un importante contributo allo studio dell'espansione dell'Universo perché contiene diverse variabili Cefeidi (cerchi rossi) e un resto di supernova di tipo "Ia" (indicata in azzurro), sorgenti che gli astronomi utilizzano come candele standard

Cassiopeia A, un resto di supernova di tipo "II"

sono invece più eterogenee. In particolare, quelle di tipo "Ia" sono esplosioni di stelle compatte (nane bianche) conseguenti al trasferimento di materia da un'altra stella in un sistema binario. L'estrema uniformità di questo genere di esplosioni - stessa luminosità di picco, stesso andamento della curva di luce, omogeneità degli spettri - ha fatto sì che gli astronomi abbiano individuato nelle supernove di tipo "Ia" un'importante categoria di "candele standard".

ANCHE NELLO STUDIO DELL'ENERGIA OSCURA LE SUPERNOVAE DI TIPO "IA" SONO PREZIOSI STRUMENTI DI INDAGINE

principio, questo campo potrebbe decelerare l'espansione cosmica in un lontano futuro, poiché i suoi effetti cambierebbero nel tempo. Distinguere tra le due alternative sarebbe già un inizio. Per il momento, per i cosmologi si tratta di uno dei misteri scientifici più rilevanti del nuovo secolo. ■

NASA, ESA, e A. Riess et al./UCG 9391, NASA JPL-Caltech/Cassiopea A

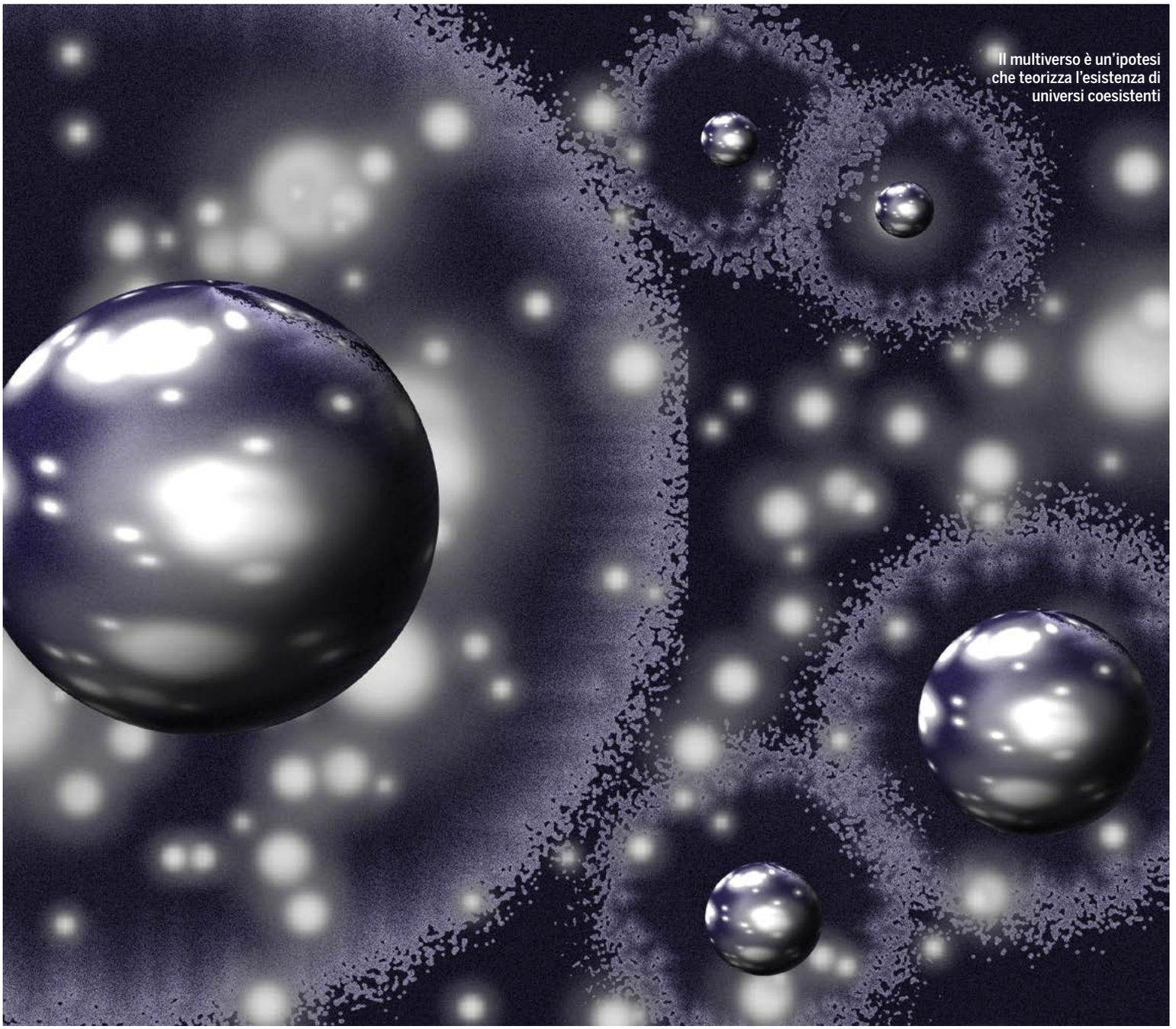
"Multiverse light sculpture", la scultura di luce (41.000 led) di Leo Villareal che si trova nel passaggio pedonale tra gli edifici est e ovest della National Gallery of Art di Washington

VIVIAMO IN UN MULTIVERSO?

L'ipotesi che il nostro non sia che uno dei tanti e forse infiniti Universi, non abita solo scenari fantascientifici. Ancor più accattivanti sono le teorie fisiche e cosmologiche che esplorano questa congettura: un viaggio verso dimensioni parallele

Northside777 Commons

L'idea scientifica che il nostro Universo non sia l'unico esistente, ma che ne esistano molti, se non infiniti altri non è recente. Risale infatti al 1957 l'articolo in cui il fisico statunitense Hugh Everett III (1930-1982) propose la sua interpretazione a molti mondi della meccanica quantistica, la teoria che spiega in termini probabilistici i fenomeni del microcosmo. Per risolvere il problema concettuale fondamentale della teoria, secondo cui un sistema fisico si trova in un certo stato solo al momento in cui lo si osserva e se ne fa una misura, Everett propose la sua idea: in realtà ogni misura non impone al sistema di scegliere uno fra i vari possibili stati in cui può essere prima della misura, perché il sistema li sceglie tutti.
In pratica, secondo Everett, ogni osservazione è un punto di diramazione di Universi: tutti i possibili risultati di una misura, e quindi tutti i possibili stati di un sistema si



Il multiverso è un'ipotesi che teorizza l'esistenza di universi coesistenti

realizzano – perciò sono tutti reali –, solo che si trovano in Universi paralleli e disgiunti, fra i quali non è possibile aprire alcuna comunicazione.
Così, per esempio, si può trovare una soluzione nel celebre esperimento concettuale del gatto di Schrödinger, dal nome del fisico austriaco Erwin Schrödinger (1887-1961), che lo propose. In questo esperimento un gatto – o un qualunque altro essere vivente – può trovarsi in uno stato in cui è simultaneamente sia vivo sia morto. Uno stato impossibile per la fisica classica dei corpi macroscopici, ma comune nel mondo microscopico, governato dalla meccanica quantistica. Una situazione paradossale che nell'interpretazione di Everett cessa di essere tale: secondo l'interpretazione a molti mondi, infatti, il gatto non è mai contemporaneamente vivo e morto, ma, più semplicemente (si fa per dire!) è vivo in un Universo e morto in un altro. Quando noi andiamo a osservare lo stato del sistema – e quindi a vedere lo stato del gatto – prendiamo una diramazione invece che l'altra, che comunque resta altrettanto reale (ma non misurabile da noi).

Hugh Everett III (1930-1982) in una foto del 1964

Clifford Pickover APOD-NASA, Commons

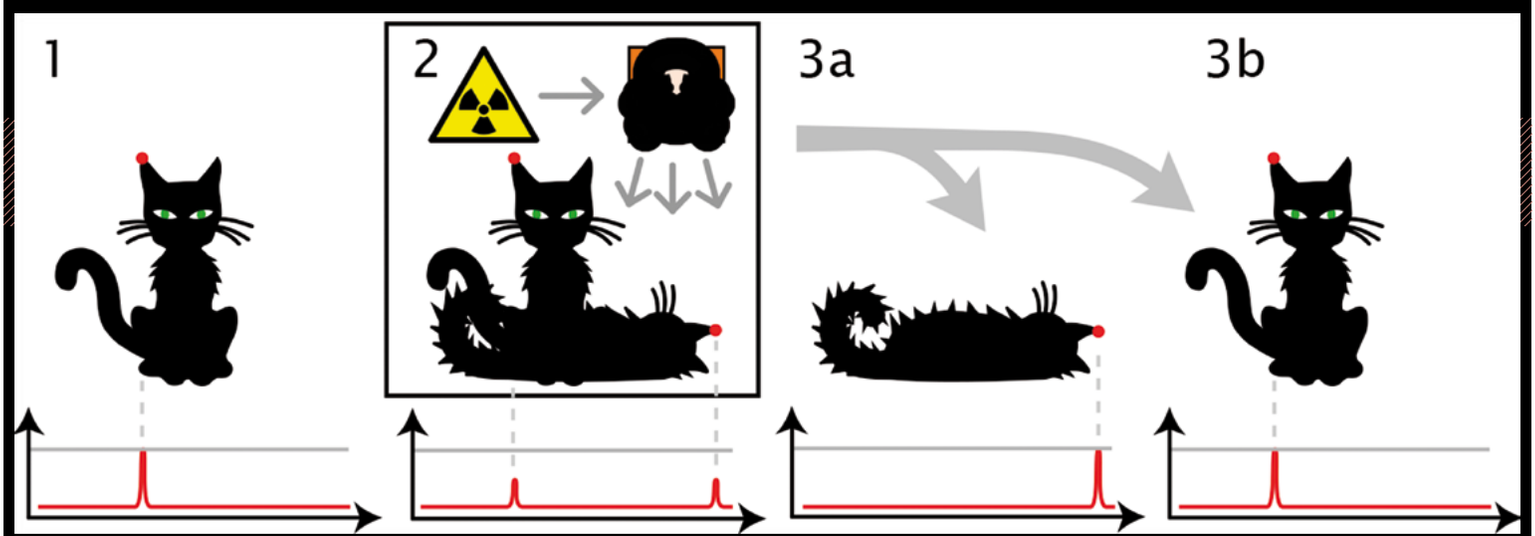
ALTRE IPOTESI, ALTRE TEORIE

Questa idea di Everett che esistano infiniti e diversi Universi paralleli, in ciascuno dei quali si realizza una fra tutte le possibili alternative che si creano in ogni istante per un certo fenomeno fisico, è stata poi ripresa più di recente anche dal fisico britannico di origine israeliana David Deutch, che ha coniato il termine "multiverso" proprio per definire l'insieme di tutti questi Universi frutto di infinite ramificazioni e conseguenti differenziazioni, secondo cui i singoli Universi non sono totalmente scollegati fra loro, ma mantengono connessioni fisiche (a livello di microcosmo quantistico), che eventualmente potrebbero essere rivelate, anche a causa di possibili interferenze reciproche. Una buona

UNIVERSI DIVERSI E SCOLLEGATI O CONTAMINAZIONI E INTERFERENZE FRA UNO E L'ALTRO?

esemplificazione di questa teoria si trova per esempio nel film "Sliding doors", dove appunto la protagonista si trova a vivere due vite diverse a seconda che riesca o meno a prendere la metropolitana – da cui le porte scorrevoli del titolo – ma dove, alla fine, si scopre che i due rami tornano nuovamente a interferire fra loro.
Oltre al suo impiego nell'ambito dello studio dei fondamenti concettuali della meccanica quantistica, l'interpretazione a molti mondi ha trovato grande considerazione in ambito cosmologico, come possibile soluzione a una serie di problemi, non ultimo quello legato all'incredibile peculiarità del nostro Universo. Già, perché, osservano alcuni, sarebbe sufficiente che una sola delle costanti fisiche fondamentali – la costante gravitazionale, la carica elettrica dell'elettrone, la costante di Planck e altre ancora – avesse un valore diverso da quello attuale e il nostro Universo sarebbe completamente diverso (e forse noi non saremmo nemmeno

L'ESPERIMENTO DEL GATTO MORTO... O VIVO

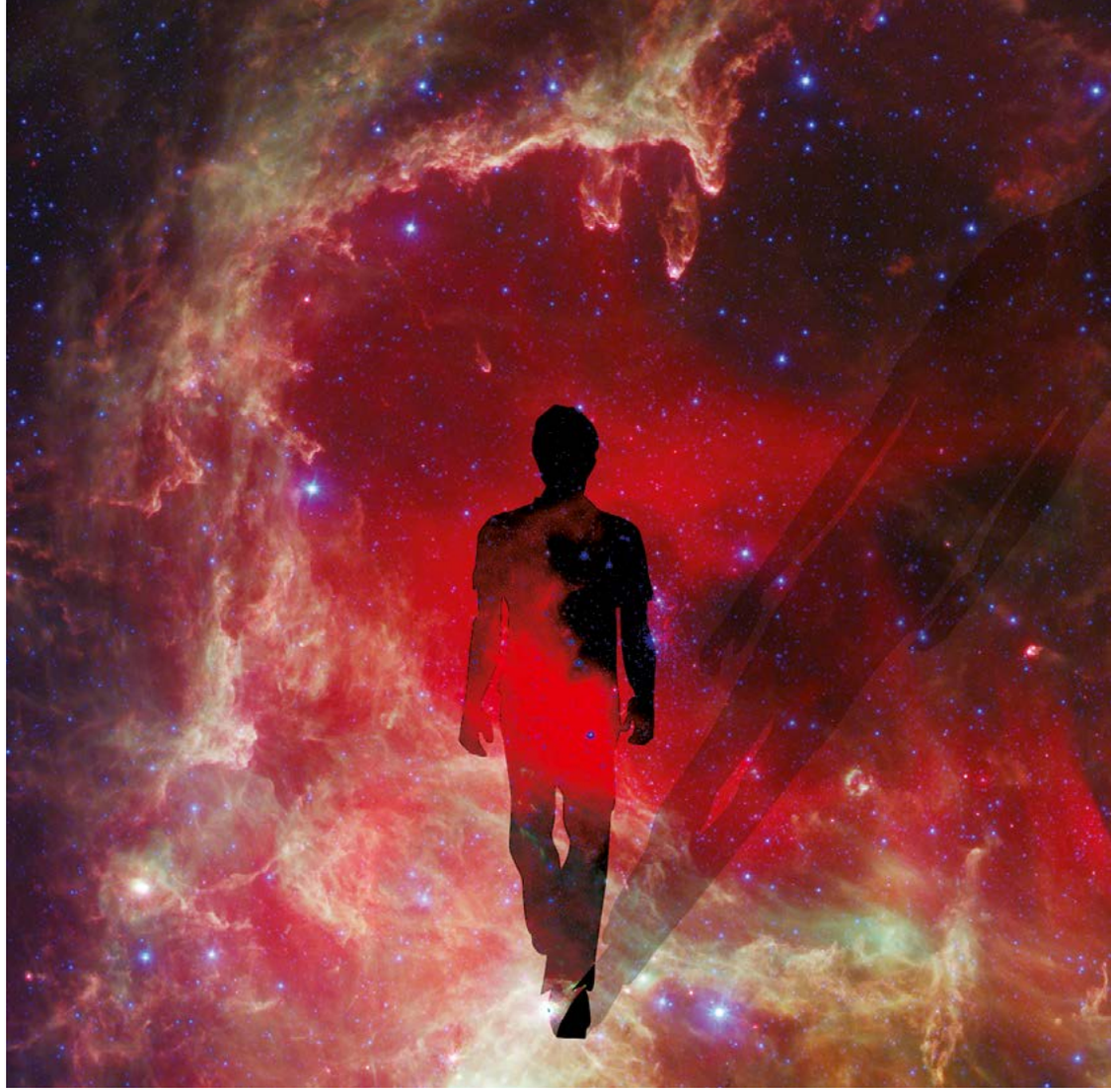


Per evidenziare alcuni aspetti apparentemente paradossali dell'interpretazione ortodossa della meccanica quantistica, Schrödinger elaborò l'esperimento del gatto contemporaneamente vivo e morto. Così lui stesso ce lo descrive: «Si possono anche costruire casi del tutto burleschi. Si rinchiuda un gatto in una scatola d'acciaio insieme alla seguente macchina infernale (che occorre proteggere dalla possibilità d'essere afferrata direttamente dal gatto): in un contatore Geiger si trova una minuscola porzione di sostanza radioattiva, così poca che nel corso di un'ora forse uno dei suoi atomi si disintegrerà, ma anche, in modo parimenti probabile, nessuno; se l'evento si verifica il contatore lo segnala e aziona un relais di un martelletto che rompe una fiala con del cianuro. Dopo avere lasciato indisturbato questo intero sistema per un'ora, si direbbe che il gatto è ancora vivo se nel frattempo nessun atomo si fosse disintegrato, mentre la prima disintegrazione atomica lo avrebbe avvelenato. La funzione Ψ [è la funzione che in meccanica quantistica descrive l'evoluzione temporale di un sistema fisico, NdA] dell'intero sistema porta ad affermare che in essa il gatto vivo e il gatto morto non sono degli stati puri, ma miscelati con uguale peso.» (Erwin Schrödinger)
Sintetizzando: 1) Il gatto è vivo, fuori dalla scatola. 2) Fino a che non si apre la scatola, il gatto dentro la scatola può essere sia vivo (se l'atomo radioattivo non è decaduto, non facendo aprire la fiala di cianuro) sia morto (se, viceversa, l'atomo radioattivo è decaduto, aprendo così la fiala di cianuro). 3) Solo aprendo la scatola (quindi facendo l'osservazione) si può scoprire se il gatto è morto (3a) o vivo (3b).Il problema nasce ovviamente dal tentativo di applicare a un oggetto macroscopico - e senziente - come un gatto le leggi della meccanica quantistica.

Disegno di Christian Schirm, opera propria Wikimedia Commons

VIVIAMO IN UN MULTIVERSO?

qui a osservarlo). Ma se fosse vera la teoria del cosmologo russo Andrej Linde sull'inflazione caotica, allora la specificità del nostro Universo non sarebbe più un problema. Secondo Linde, infatti, è proprio il meccanismo dell'espansione inflazionaria a innescare la produzione incessante di infiniti Universi, tutti differenti fra loro. Perché questo accada, l'Universo prima dell'inflazione deve trovarsi in una situazione caotica, in cui ogni regione di spazio ha una densità di energia diversa. In queste condizioni, l'inflazione si sviluppa in modo disordinato, con regioni che restano stabili, altre che collassano, altre che, invece, iniziano a espandersi secondo l'inflazione (una di queste è la nostra). In questo modo, ogni regione è in realtà un Universo indipendente, e il multiverso è in pratica una fitta e intricata rete di ramificazioni di universi. Partendo da questa idea degli Universi ramificati è poi stata sviluppata e portata avanti da molti fisici teorici e cosmologi l'ipotesi che esistano infiniti Universi, in continua formazione, e che ciascuno di questi sia dotato di leggi fisiche proprie. Alcuni cosmologi ipotizzano addirittura che i buchi neri non siano altro che tunnel di passaggio verso altri Universi, i quali a loro volta possono contenere altri buchi neri contenenti altri Universi e così via, all'infinito. Ma l'impossibilità di sottoporre a verifica sperimentale tutte queste teorie, e, soprattutto, di osservare gli altri Universi che esisterebbero parallelamente al nostro, le avvicina più alla metafisica che alla fisica. Anche se, come accennato, secondo alcuni potrebbe anche essere possibile trovare tracce di interazioni fra la nostra parte di Universo e altre parti di altri Universi.

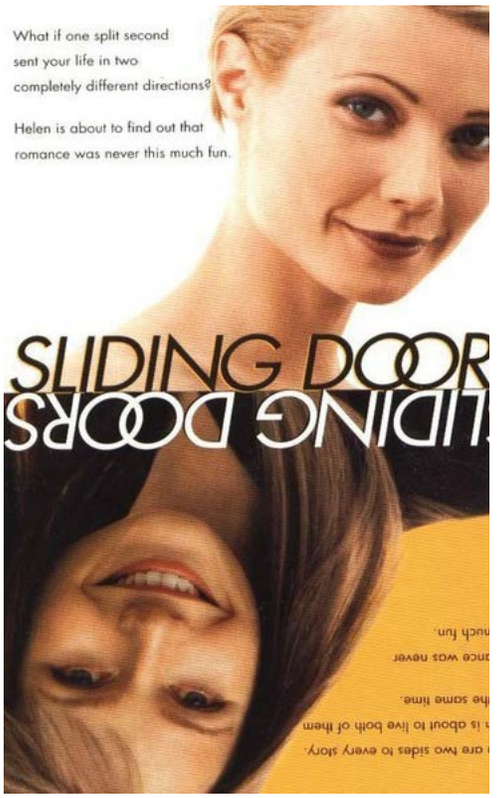


Simon Benjamin, Commons

Il fisico britannico David Deutch che coniò il termine multiverso

IL PRINCIPIO ANTROPICO

Secondo il fisico australiano Brandon Carter il nostro Universo, anche tra molti altri, sarebbe comunque speciale. Nel 1973 egli formalizzò il principio secondo cui la posizione dell'uomo nell'Universo, per quanto periferica possa essere, è comunque privilegiata, in quanto l'Universo si è evoluto nel tempo fino a sviluppare al suo interno una forma di vita intelligente capace di



A lato, IC 1805, nella costellazione di Cassiopea, è una regione di intensa formazione stellare. Secondo il fisico Brandon Carter, che ha postulato il Principio Antropico, il nostro Universo sarebbe molto speciale perché ha generato la vita e l'uomo.
La locandina del film "Sliding doors", diretto nel 1998 da Peter Howitt e interpretato da Gwyneth Paltrow

comprenderlo. Questo principio, proprio perché riporta per certi versi l'uomo al centro dell'Universo, è noto come Principio Antropico, che è appunto il nome che gli attribuì direttamente Carter. In pratica si tratta di un inversione del Principio Copernicano, che aveva guidato fino a quel momento gli sviluppi dell'astrofisica e della cosmologia, ponendo la Terra e l'uomo in una posizione spaziale (e temporale) del tutto indifferente rispetto alla storia dell'Universo stesso: noi abitiamo su un pianeta qualsiasi che orbita attorno a una stella qualsiasi alla periferia di una galassia qualsiasi, a sua volta posta alla periferia di un ammasso di galassie qualsiasi, fra le centinaia di miliardi di galassie costituite da centinaia di miliardi di stelle ciascuna che popolano l'Universo conosciuto.
Così, mentre Copernico aveva spostato definitivamente l'uomo dal centro dell'Universo, Carter in una certa maniera riportava l'attenzione sul fatto che l'umanità occupa comunque una posizione speciale nell'Universo: secondo Carter, l'uomo, invece di essere un prodotto casuale e non necessario dell'evoluzione dell'Universo, è piuttosto parte integrante e sostanziale del suo sviluppo. In altre parole, espresso nella sua formulazione cosiddetta "forte", il principio antropico sostiene che l'Universo si è evoluto così proprio perché al suo interno potesse svilupparsi una civiltà intelligente capace di osservarlo e comprenderlo. Noi non saremmo quindi ospiti inattesi del cosmo, ma, secondo i sostenitori del principio antropico forte, saremmo addirittura il fine ultimo dell'Universo. Come scrissero il cosmologo inglese John Barrow e il fisico statunitense Frank Tipler nel loro celebre saggio "The Antropic Cosmological Principle", pubblicato nel 1986: "L'Universo deve avere proprietà che a un certo punto della sua storia permettono alla vita di svilupparsi al suo interno."
È ovvio che non tutti i cosmologi possano essere d'accordo con questa affermazione, tanto che esiste anche una versione cosiddetta "debole" dello stesso principio, secondo cui, citando ancora Barrow e Tipler, "i valori osservati di tutte le quantità fisiche e cosmologiche non sono equamente probabili, ma sono limitati dal requisito che esistono luoghi

IL PRINCIPIO ANTROPICO TEORIZZA CHE L'UNIVERSO SI È EVOLUTO NEL MODO CHE CONOSCIAMO PER OSPITARE UNA CIVILTÀ INTELLIGENTE

Lori Allen, Xavier Koenig (Harvard-Smithsonian CfA) et al., JPL-Caltech, NASA

BREVE STORIA DELLA MECCANICA QUANTISTICA

Verso la fine del diciannovesimo secolo, i fisici sperimentali continuavano a raccogliere dati su esperimenti a cui ancora nessuno era riuscito a dare risposta. Lo spettro del Sole, la struttura dell'atomo, i raggi X, la radioattività. Max Planck (1858-1947), invece, studiava termodinamica: e fu lì che trovò la risposta. La luce, ipotizzò in una riunione svoltasi alla fine dell'anno 1900 e passata alla storia, viene emessa in quanti di radiazione, cioè per unità discrete, e non con continuità come avevano pensato fino a quel momento. Da allora il fisico tedesco è noto come il padre della fisica moderna. Quella ipotesi infatti risolveva brillantemente alcuni problemi e forniva nuove, impensate possibilità agli altri problemi che si stavano col tempo accumulando sulle scrivanie senza soluzione. Nel frattempo Niels Bohr (1885-1962), danese di Copenaghen, sviluppava un modello di struttura atomica in cui gli elettroni, per passare da un'orbita a un'altra, cioè per cambiare il loro stato energetico, dovevano emettere o assorbire proprio uno di quei quanti di radiazione. L'austriaco Erwin Schrödinger (1887-1961) formalizzò in un'equazione che prende il suo nome il moto dei primi all'interno dell'atomo, fondando così la meccanica ondulatoria. L'equazione di Schrödinger forniva il necessario supporto teorico al modello atomico di Bohr, ma con una differenza sostanziale. In questa equazione infatti non si descrive propriamente il moto di una particella, ma l'evoluzione temporale di una grandezza, la cosiddetta funzione d'onda, che contiene tutte le informazioni necessarie alla rappresentazione del sistema in esame (per esempio, l'atomo di idrogeno, oppure un elettrone libero, e così via). La funzione d'onda è una grandezza complessa che non ha analogo classico: non era perciò facile trovarne la corretta interpretazione. Per questo venne in aiuto Max Born (1882-1970), il quale fece per la prima volta comparire il concetto di densità di probabilità in fisica. In un certo senso, la funzione d'onda non ci dice dove sarà la particella dopo un certo intervallo di tempo, come invece fanno le equazioni della meccanica classica, bensì ci dice quanto sarà la probabilità che, trascorso quell'intervallo di tempo, noi la possiamo effettivamente trovare in quella posizione. Il più sembrava fatto, ma non era così. Werner Heisenberg (1901-1976), giovane brillante, si dedicava da tempo allo studio della struttura atomica per altra via da quella di Schrödinger. Il suo formalismo si rivelò equivalente a quello di Schrödinger, tuttavia, nelle sue peregrinazioni teoriche, aveva fatto una scoperta importante: il principio di indeterminazione. Il principio di indeterminazione di Heisenberg sancisce infatti i limiti teorici invalicabili alle nostre capacità di compiere misurazioni precise su coppie di grandezze, dette "variabili coniugate", della particella, come, per esempio, posizione e quantità di moto (che è il prodotto della massa per la velocità della particella). In particolare, maggiore è la precisione con cui si misura la posizione di una particella, minore è la precisione con cui è nota la sua quantità di moto (e quindi la velocità), e viceversa.

Ecco perché, a livello microscopico, non è più possibile parlare di traiettoria ed è necessario introdurre il concetto di probabilità.

Ma il mondo microscopico riserva ancora nuove sorprese. Gli scienziati già da tempo avevano osservato strani comportamenti nella materia e nella luce. Il francese Louis De Broglie (1892-1987), nella sua tesi di dottorato in fisica, ipotizzò dunque l'esistenza di un comportamento complementare sia nella luce sia nella materia. A seconda del fenomeno fisico coinvolto, la luce poteva comportarsi come onda o come particella, come pure la materia, ma i due diversi comportamenti, quello ondulatorio e quello corpuscolare, non si manifestavano mai insieme (principio di complementarietà).

Nel corso dell'ultimo secolo, la meccanica quantistica è stata verificata da un'enorme quantità di esperimenti e le sue previsioni si sono sempre rivelate vere. È quindi uno dei più grandi risultati teorici mai raggiunti nella scienza e un caposaldo della fisica moderna: essa fornisce infatti una descrizione precisa delle leggi che regolano il microcosmo.

The MacTutor website, Commons

LE DIVERSE TEORIE SUI MULTIVERSI VIVACIZZANO IL DIBATTITO SCIENTIFICO

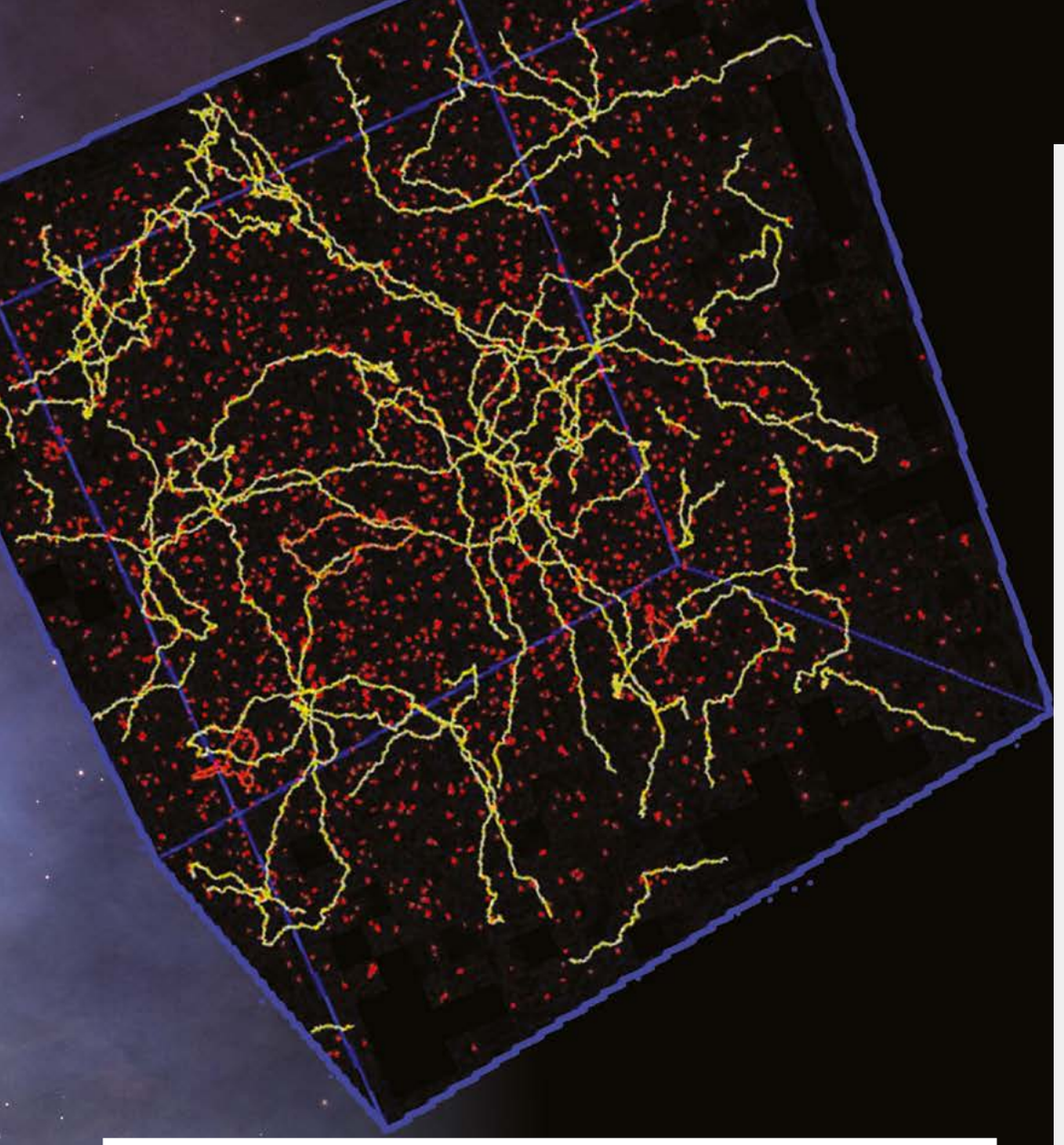
Illustrazione di un buco nero davanti alla Grande Nube di Magellano. E se, come pensano alcuni cosmologi, i buchi neri fossero tunnel per arrivare ad altri Universi?

dove può evolversi la vita basata sul carbonio e dal requisito che l'Universo sia abbastanza vecchio da averlo già permesso." Un'affermazione in un certo senso ovvia, visto che almeno un caso in cui tali requisiti vengono rispettati esiste, ed è proprio il nostro Universo. Nella sua formulazione "debole", il principio si limita ad affermare che nello studio della cosmologia dobbiamo tenere conto di un dato sperimentale importante, ovvero dell'esistenza della vita e dell'uomo nell'Universo. In pratica, il fatto che noi esistiamo impone dei vincoli sul valore che le costanti della natura possono assumere. Non è difficile immaginare che il dibattito attorno a questi temi sia stato piuttosto acceso. Le varie ipotesi a molti mondi, o degli infiniti universi o del multiverso, nelle loro diverse formulazioni, rispondono in un certo senso anche all'esigenza di spiegare da un lato la particolarità del nostro Universo, dall'altro di mantenere valido il Principio Copernicano. Il nostro Universo sarebbe infatti un Universo qualsiasi fra gli infiniti Universi possibili, ma, per una circostanza casuale – e fortunata – è nato con i valori delle costanti fisiche esattamente adatti a far sì che, a un certo momento della propria evoluzione, sia stato possibile lo sviluppo di forme di vita e, in conseguenza, di almeno una civiltà intelligente: la nostra. Tutti gli altri Universi, con eventuali leggi fisiche e costanti di natura diverse dalle nostre possono avere evoluzioni totalmente diverse da quella del nostro, e non arrivare mai a produrre forme di vita coscienti e capaci di leggere e comprendere l'Universo in cui si trovano. In estrema sintesi, gli unici Universi conoscibili sono quelli in cui leggi e costanti fisiche sono tali da portare, a un certo punto della loro evoluzione, alla nascita di una forma di vita intelligente. ■

Alain r Commons

L'immagine del Telescopio Spaziale Hubble dei "pilastri della creazione", una zona di formazione stellare nella Nebulosa Aquila (M16), fa da sfondo a una simulazione delle stringhe cosmiche

ESA, S. Larsen (Radboud University, the Netherlands)



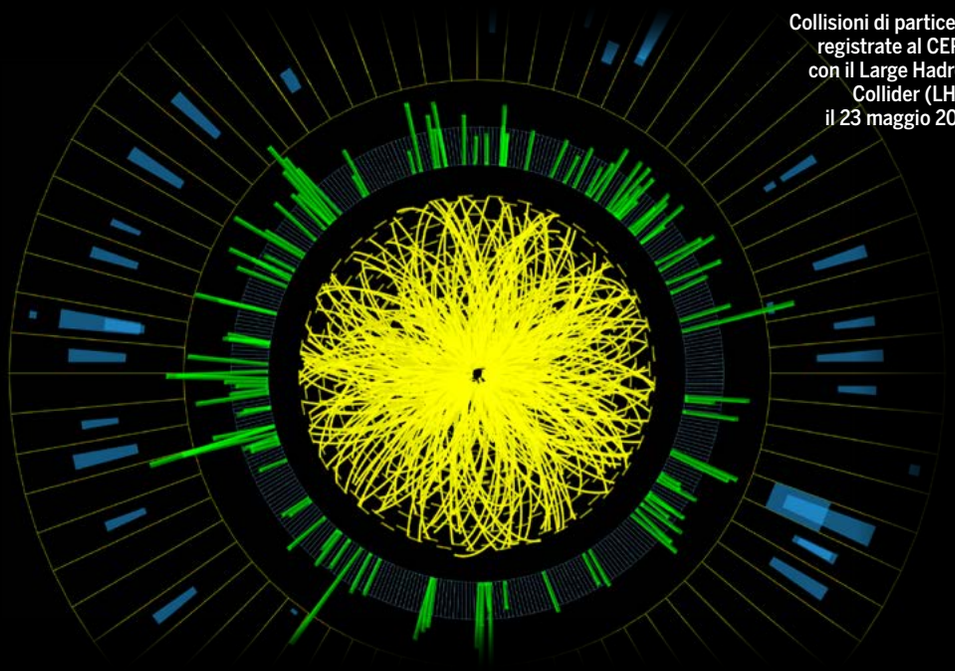
PRIMA DEL BIG BANG

Suggestivi studi di frontiera ipotizzano che il grande "botto" potrebbe non essere stato l'origine dell'Universo. Antecedente a esso, un "mare" di vuoto agitato solo da piccole onde. Trovare le prove sarà un'altra incredibile sfida per gli scienziati

Fino a circa venticinque anni fa chiedere che cosa ci fosse prima del Big Bang sembrava una domanda fisicamente senza senso, la cui risposta poteva vagare su argomentazioni di carattere religioso o filosofico, e comunque metafisico. I trattati di cosmologia ci dicevano infatti che spazio e tempo "nascevano" con il Big Bang, l'istante primigenio da cui l'Universo aveva origine, e che "prima" o "oltre" erano concetti esclusi a priori dalla cosmologia standard.
Nel frattempo però, il fisico fiorentino Gabriele Veneziano, in forze prima all'Istituto Weizmann in Israele e poi alla Divisione Teorica del CERN di cui è poi stato per lungo tempo direttore, lavorava (più o meno) nell'ombra a una sua idea, a quei tempi veramente poco ortodossa (era la metà degli anni Sessanta), che interpretava le particelle elementari non come "punti" senza dimensione, ma come minuscole "corde" monodimensionali. Con queste piccole "corde" (*string*, in inglese, da cui l'espressione ormai invalsa nell'uso di "teoria delle stringhe"), Veneziano era in grado di spiegare, dal punto di vista teorico, molte proprietà osservate nelle interazioni forti, ovvero nelle forze che tengono assieme protoni e neutroni nel nucleo dell'atomo. Purtroppo per lui, quella prima teoria si rivelò incompleta, ma il fisico proseguì imperterrito i suoi studi teorici, seguito nel tempo da numerosi allievi. Forse nemmeno Veneziano e i suoi collaboratori si aspettavano che, a partire dagli anni Ottanta, la "teoria delle stringhe", nella sua versione supersimmetrica, cosiddetta delle "superstringhe", sarebbe diventata una vera e propria Teoria di Grande Unificazione, ovvero una di quelle teorie volte a fornire una descrizione unitaria di tutte le particelle e di tutte le interazioni. Con l'incredibile capacità, ancora negata ad altre teorie, di inserire in un disegno unificato non solo le tre forze attive a livello del microcosmo (nucleare forte, nucleare debole e elettromagnetica), ma

B. Allen & E.P. Shellard

ACCELERATORI DI PARTICELLE



Collisioni di particelle registrate al CERN con il Large Hadron Collider (LHC) il 23 maggio 2017

Lo studio del comportamento e delle caratteristiche fisiche delle particelle elementari si effettua grazie a particolari apparecchiature, dette acceleratori di particelle. Definiti in estrema sintesi, questi sono strumenti all'interno dei quali nuclei atomici, protoni o elettroni vengono accelerati per mezzo di campi elettrici e magnetici fino a raggiungere elevati valori di energia cinetica (che è l'energia connessa al movimento, e quindi alla velocità). Una volta terminata la fase di accumulazione delle particelle e di relativa accelerazione, il fascio di particelle viene lanciato o contro un bersaglio fisso o, preferibilmente, contro un altro fascio che viaggia in direzione opposta. In questa seconda ipotesi, l'acceleratore si chiama "collider" (collisore) e i due fasci contrapposti sono tipicamente composti uno da particelle di materia, l'altro dalle corrispondenti particelle di antimateria.
L'urto ad alta energia che ne consegue permette la produzione di moltissime particelle di vario tipo. Dallo studio delle tracce lasciate nei rivelatori, posizionati nei punti dell'acceleratore in cui vengono fatti avvenire gli scontri fra i due fasci o fra il fascio e il bersaglio fisso, è possibile risalire al tipo di particella che l'ha lasciata, alla sua energia, a quale interazione l'ha prodotta, a quali sono le eventuali particelle in cui decade e così via.
Le energie cinetiche massime raggiungibili dalle particelle all'interno di un acceleratore dipendono da svariati fattori, in particolare dal tipo di particelle impiegate (gli elettroni, molto leggeri, accelerano più facilmente dei protoni, circa 2000 volte più massicci), dalla tipologia di campi elettrici e magnetici impiegati, dalle caratteristiche costruttive, come, per esempio, la lunghezza utile del "tubo a vuoto" all'interno del quale vengono appunto accelerate le particelle. In generale, più è lungo l'acceleratore, maggiore è l'energia massima raggiungibile, maggiore quindi la possibilità di indagare più a fondo nella struttura intima della materia. Con gli acceleratori attuali siamo stati in grado di confermare praticamente il Modello Standard delle particelle elementari, e di scoprire l'elusivo bosone di Higgs, che i fisici hanno "catturato" con il "Large Hadron Collider" (LHC), la macchina acceleratrice attualmente in funzione al CERN di Ginevra (inaugurata nel 2008), dove ha preso il posto del "Large Electron Positron Collider" (LEP), operativo dal 1989 al 2000.
Molto più difficile sarà trovare evidenze sperimentali a supporto delle "Teorie di Grande Unificazione" o di un'eventuale "Teoria del Tutto". Esse prevedono infatti fenomeni che dovrebbero verificarsi a scale di energia molto al di là delle possibilità tecniche di qualunque macchina acceleratrice attualmente in funzione o in costruzione. Molti fisici affidano le loro speranze alla scoperta di prove della supersimmetria, che è condizione necessaria – ma non sufficiente – per l'esistenza delle superstringhe. Ma la capacità di esplorare sperimentalmente regioni di energia sempre più elevate è quasi certamente legata alla realizzazione di nuovi tipi di acceleratori che si basino su principi fisici diversi da quelli impiegati fino a oggi.

anche la forza gravitazionale, finora sfuggita a ogni tentativo di "unificazione". Il problema, ben noto ai fisici già ai tempi di Einstein, è quello di "quantizzare" il campo gravitazionale, mentre la Teoria della Relatività Generale è una teoria non quantistica, ma classica, che descrive l'interazione fra masse in termini puramente geometrici.
La descrizione delle particelle e dei campi in termini di stringa richiede però una riscrittura delle equazioni relativistiche del campo gravitazionale che sembra risolvere non solo questo problema, ma anche quello, forse più drammatico, delle "singolarità", ovvero dei valori infiniti raggiunti da certi parametri fisici (densità, temperatura ecc.) nella descrizione di alcuni fenomeni gravitazionali, quali i buchi neri e, naturalmente, il Big Bang. Con le stringhe di Veneziano il "Grande Botto" non è più una singolarità, ma non è più nemmeno l'istante da cui ha avuto origine l'Universo. A questo infatti preesiste – da un tempo forse infinito – un vuoto quantistico, paragonabile a un mare in bonaccia sulla superficie del quale talvolta alcune piccole onde si increspano. È proprio dal "collasso" di una di queste onde, particolarmente energetica e dalle dimensioni non superiori a quelle di un nucleo atomico, che la teoria delle stringhe dice sia nato il nostro Universo. In pratica, l'Universo in cui viviamo è visto come l'interno di un buco nero, come uno dei tanti possibili Universi, che si sono formati, si stanno formando, si formeranno a partire dalle fluttuazioni di quel "mare" di vuoto.
Per ora è solo teoria, oppure esiste qualche osservazione che supporta queste idee? Per rispondere a questa domanda, occorre scoprire quali possono essere le tracce osservabili dell'Universo prima del Big Bang, se

Thomas Mc Cauley/CERN, for the benefit of the CMS Collaboration

TEORIE DEL TUTTO

Uno degli scopi della fisica è di riuscire a descrivere fenomeni apparentemente diversi con un'unica e semplice teoria unificata. Una teoria unificata offre una spiegazione più elegante delle osservazioni e può predire fenomeni sconosciuti. Secondo i fisici ci sono valide ragioni, sia teoriche sia sperimentali, per ritenere che anche le quattro forze fondamentali (nucleare forte, elettromagnetica, nucleare debole, gravitazionale) siano in realtà la manifestazione di un'unica interazione.

Per questa ragione hanno formulato diverse teorie, in grado di descrivere sia le interazioni elettrodeboli che le interazioni forti: tali teorie vanno tutte sotto l'acronimo GUT (dall'inglese "Grand Unified Theory"). Secondo queste teorie, decisamente pionieristiche e complesse, i quark possono trasformarsi in leptoni: ciò significa che i protoni sono instabili e che prima o poi devono disintegrarsi. Benché il tempo di dimezzamento del protone sia superiore all'età attuale dell'Universo, si dovrebbe poter verificare la previsione osservando un numero molto grande di protoni. Finora, però, nessun evento del genere è stato segnalato con certezza. È interessante osservare che, secondo le teorie di unificazione, ad altissime energie le intensità delle varie forze dovrebbero tutte convergere su un valore, dimostrando che le diverse interazioni sono in realtà aspetti diversi di un singolo campo unificato, che viene chiamato "superforza".

Una strada alternativa per l'unificazione delle interazioni fondamentali, capace di comprendere anche la gravitazione, è la Supersimmetria. Per comprenderla, occorre ricordare che a tutte le particelle è associato lo spin, grandezza che ne definisce il momento angolare intrinseco. In particolare, le particelle con spin nullo o intero sono dette bosoni, quelle con spin semi-intero (frazionario) fermioni. I fermioni rispondono al "principio di esclusione" di Pauli, secondo il quale due fermioni identici non possono occupare lo stesso stato quantico. Secondo la Supersimmetria, i fermioni, ovvero le particelle che costituiscono la materia, e i bosoni, che invece mediano le forze, hanno profonde simmetrie in comune. In particolare, il modello richiede che ciascuna particella nota abbia una corrispondente supersimmetrica di massa relativamente grande: così, all'elettrone (fermione) corrisponderebbe il selettrone (bosone), al fotone (bosone) il fotino (fermione) e così via. I fisici teorici hanno costruito varie teorie supersimmetriche di grande unificazione e anche teorie quantistiche della gravitazione. Un esempio è la cosiddetta Supergravitazione, secondo la quale i gravitoni hanno compagni supersimmetrici detti gravitini. Nelle teorie quantistiche della gravitazione (gravità quantistica), a piccolissima scala lo spazio-tempo non è uniforme, ma è animato da continue fluttuazioni quantistiche, che ne variano localmente la curvatura.

I tentativi di unificazione delle teorie quantistiche dei campi, che spiegano interazione forte, elettromagnetica e debole, con la teoria della relatività generale, che invece spiega l'interazione gravitazionale non in termini quantomeccanici, ma in termini geometrici di distorsione dello spazio-tempo, si sono rivelati sinora infruttuosi. A tutt'oggi, infatti, ancora nessuno è stato in grado di unificare la teoria quantistica dei campi con la teoria della relatività generale in una cosiddetta "teoria del tutto" capace di comprendere in un'unica descrizione le quattro interazioni fondamentali. Il modello che attualmente più si avvicina a una "Teoria del Tutto", come viene chiamata la teoria che dovrebbe riunire in una descrizione unificata le quattro interazioni fondamentali, compresa quindi quella gravitazionale, è la "Teoria M", uno sviluppo delle diverse teorie delle superstringhe proposto nel 1995 dal fisico teorico statunitense Edward Witten. Cosa la lettera "M" stia a significare è ancora incerto. Witten lascia aperte le possibilità: membrana, mistero, magia, madre. In tutte queste teorie le particelle non sono più considerate puntiformi, ma hanno un'estensione, come se fossero delle piccolissime cordicelle (da cui il termine stringhe) o superfici (da cui il termine "brane", da membrana). In generale, le teorie delle superstringhe necessitano di spazi a molte più dimensioni (almeno dieci) rispetto alle quattro ordinarie dello spazio-tempo. La maggior parte di queste è inaccessibile all'osservazione perché "arrotolate" su se stesse su dimensioni dell'ordine di un centomilionesimo del raggio del protone.

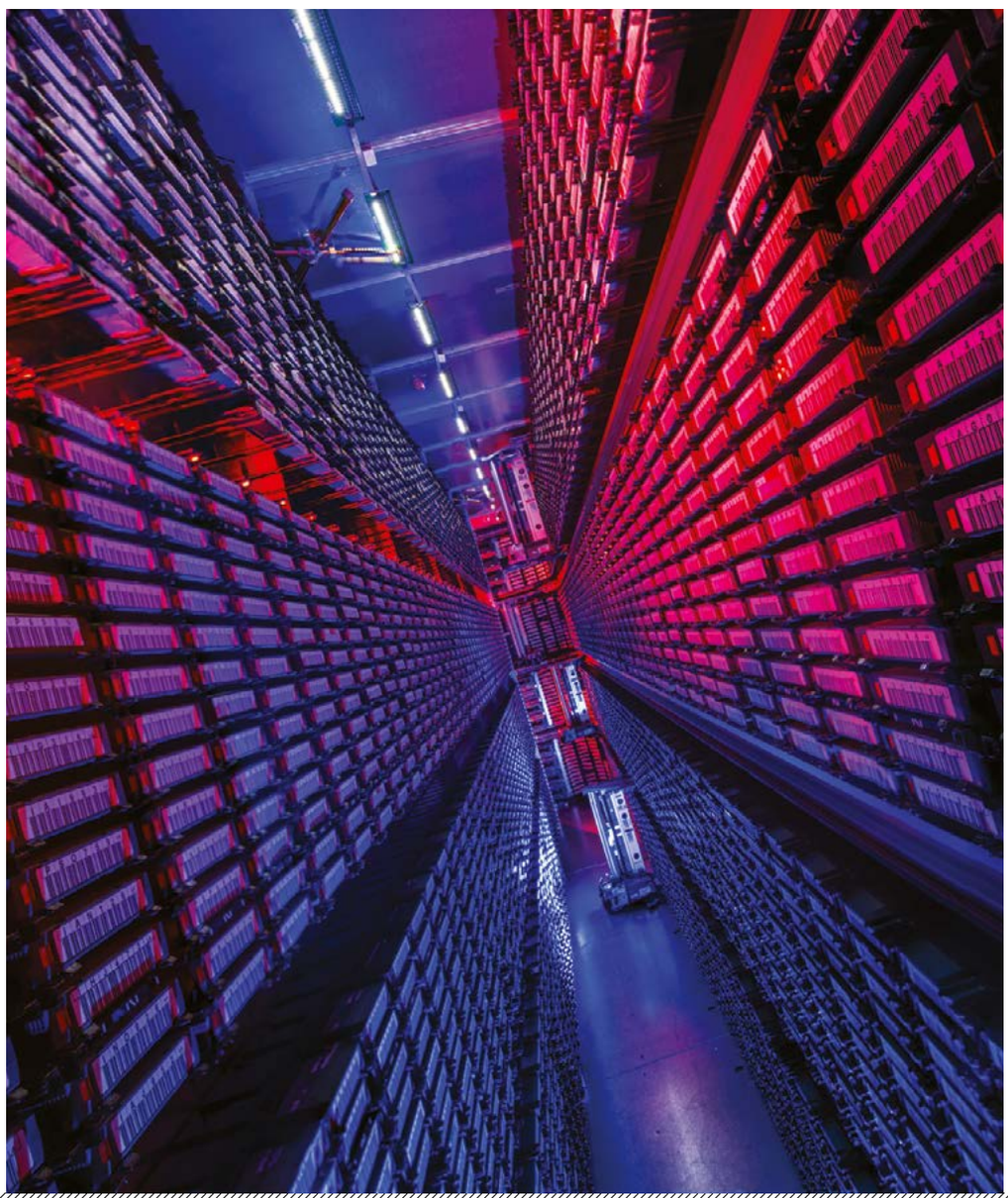
Anche per questo motivo il conforto sperimentale a queste teorie è ancora lontano.

LA TEORIA DELLE STRINGHE CONSIDERA LE PARTICELLE ELEMENTARI NON COME PUNTI, MA COME IMPERCETTIBILI "CORDE" VIBRANTI

Il matematico e fisico statunitense Edward Witten mentre illustra la teoria della Superstringhe alla Chalmers University of Technology, Gothenburg, Svezia

Ojan Commons

Due immagini del Fermilab, imponente laboratorio per lo studio della fisica dei neutrini situato a Batavia, vicino a Chicago. Qui a lato una visione aerea: in primo piano il Main Injector, sullo sfondo Tevatron l'acceleratore di particelle più avanzato al mondo che copre una circonferenza di 6,4 chilometri. In basso, un particolare del raffinatissimo sistema robotico in grado di memorizzare 500 petabyte (1 petabyte equivale a un biliardo di byte)



Fermilab, Reidar Hahn

sono ancora osservabili, se esistono o esisteranno strumenti in grado di rivelarle: dilatoni e assioni (tipi di particelle ipotetiche previste dalla teoria delle stringhe), ma anche onde gravitazionali primordiali diffuse nell'Universo come un fondo cosmico non dissimile da quello a microonde della radiazione elettromagnetica. Alcuni strumenti potrebbero già "scovare" qualche indizio, altri in un prossimo futuro. Ma qualche osservazione, come per esempio l'espansione accelerata dell'Universo scoperta attraverso lo studio delle supernovae di tipo "Ia", trova già una spiegazione più naturale nell'ambito della cosmologia di stringa che non in quella standard. Lo stesso vale per la durata del periodo inflattivo, per i valori delle costanti universali, e altro ancora. Tante risposte, quindi, dal punto di vista teorico, ma ancora nessuna prova reale e indiscutibile a supporto, almeno per ora. Ecco perché molti cosmologi si muovono con i piedi di piombo in questo campo. Tuttavia, se tutto questo si dimostrasse vero – ma occorrono tecnologie probabilmente ancora fuori dalla nostra portata – ci troveremmo di fronte all'ultima e forse definitiva "rivoluzione copernicana": quella che trasforma il Big Bang in un istante qualsiasi di un Universo qualsiasi fra le miriadi che nascono, evolvono e muoiono nel tempo senza fine del vuoto quantistico. ■

UN RISCONTRO SPERIMENTALE DELLE VARIE TEORIE DELLE STRINGHE È TUTTORA LONTANO

I GRANDI MISTERI DELL'UNIVERSO

I GRANDI MISTERI DELL'UNIVERSO

Bimestrale - prezzo di copertina 9,90 €
www.bbcscience.it

Direttore responsabile: Luca Sprea

Realizzazione Editoriale a cura di:
Studio Editoriale Brillante s.r.l. diretto da Giuseppe Brillante
redazione@bbcscience.it - info@studioeditorialebrillante.it

Collaboratori:
Claudia Reali, Anna Cessa

Sprea S.p.A.
Socio Unico - direzione e coordinamento di Gestione Editoriale S.p.A.

Presidente: Luca Sprea
CDA: Mario Sprea, Claudio Rossi (pubblicità e marketing)
Andrea Franchini (responsabile qualità editoriale)
Art director: Silvia Taietti

Coordinamento:
Gabriella Re (Foreign Rights), Silvia Vitali - international@sprea.it, Ambra Palermi (Coordinamento Editoriale), Alessandra D'Emilio e Roberta Tempesta (Segreteria Editoriale) Francesca Sigismondi (ufficio legale), Tiziana Rosato (acquisti e produzione)

Amministrazione:
Erika Colombo (responsabile), Irene Citino, Sara Palestra
amministrazione@sprea.it

SERVIZIO QUALITÀ EDICOLANTI E DL
Sonia Lancellotti: tel. 0292432295 - distribuzione@sprea.it

PUBBLICITÀ
Segreteria Marketing: Emanuela Mapelli - Tel. 0292432244 - pubblicita@sprea.it

Sede Legale: Via Torino, 51 20063 Cernusco Sul Naviglio (Mi) - Italia
PI 12770820152- Iscrizione camera Commercio 00746350149
Per informazioni, potete contattarci allo 02 924321

Registrazione testata: BBC Science World, registrata al tribunale di Milano il 03/12/2010 con il numero 649.

Distributore per l'Italia e per l'estero: Press-Di Distribuzione stampa e multimedia S.r.l. - 20090 Segrate - ISSN: 2239-7167

Stampa: Arti Grafiche Boccia S.p.A.- Salerno

Copyright Sprea S.p.A.

La Sprea S.p.A. titolare esclusiva della testata BBC Science World e di tutti i diritti di pubblicazione e di diffusione in Italia. L'utilizzo da parte di terzi di testi, fotografie e disegni, anche parziale, è vietato. L'Editore si dichiara pienamente disponibile a valutare - e se del caso regolare - le eventuali spettanze di terzi per la pubblicazione di immagini di cui non sia stato eventualmente possibile reperire la fonte. Informativa e Consenso in materia di trattamento dei dati personali (Codice Privacy d.lgs. 196/03). Nel vigore del D.Lgs 196/03 il Titolare del trattamento dei dati personali, ex art. 28 D.Lgs. 196/03, è Sprea S.p.A. (di seguito anche "Sprea"), con sede legale in Via Torino, 51 Cernusco sul Naviglio (MI). La stessa La informa che i Suoi dati, eventualmente da Lei trasmessi alla Sprea, verranno raccolti, trattati e conservati nel rispetto del decreto legislativo ora enunciato anche per attività connesse all'azienda. La avvisiamo, inoltre, che i Suoi dati potranno essere comunicati e/o trattati (sempre nel rispetto della legge), anche all'estero, da società e/o persone che prestano servizi in favore della Sprea. In ogni momento Lei potrà chiedere la modifica, la correzione e/o la cancellazione dei Suoi dati ovvero esercitare tutti i diritti previsti dagli artt. 7 e ss. del D.Lgs. 196/03 mediante comunicazione scritta alla Sprea e/o direttamente al personale Incaricato preposto al trattamento dei dati. La lettura della presente informativa deve intendersi quale presa visione dell'Informativa ex art. 13 D.Lgs. 196/03 e l'invio dei Suoi dati personali alla Sprea varrà quale consenso espresso al trattamento dei dati personali secondo quanto sopra specificato. L'invio di materiale (testi, fotografie, disegni, etc.) alla Sprea S.p.A. deve intendersi quale espressa autorizzazione alla loro libera utilizzazione da parte di Sprea S.p.A. Per qualsiasi fine e a titolo gratuito, e comunque, a titolo di esempio, alla pubblicazione gratuita su qualsiasi supporto cartaceo e non, su qualsiasi pubblicazione (anche non della Sprea S.p.A.), in qualsiasi canale di vendita e Paese del mondo.

Il materiale inviato alla redazione non potrà essere restituito.

LE INDAGINI PIÙ RECENTI E LE AFFASCINANTI TEORIE PER COMPRENDERE I SEGRETI DEL COSMO.

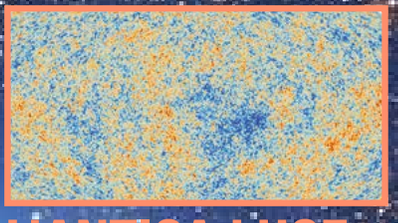
Uno strumento indispensabile per tutti quelli che desiderano approfondire la conoscenza dello Spazio. Un meraviglioso viaggio tra pianeti, stelle, buchi neri e galassie.

I GRANDI MISTERI DELL'UNIVERSO

IL NOSTRO SOLE
Quale sarà il suo destino? Esploderà o avrà una morte "dolce"?

EDWIN HUBBLE
I preziosi contributi dell'astronomo e astrofisico statunitense

LE SUPERNOVAE
Le grandi alleate dei cosmologi per capire l'età dell'Universo



L'ANTICA LUCE
Ecco tutto quello che ci rivela la radiazione cosmica di fondo

I PIANETI
L'"avventurosa" origine del Sistema Solare e dei suoi "abitanti"

LE RICERCHE
L'incredibile apporto alla conoscenza della radioastronomia

I CONFINI
L'Universo è davvero infinito? È possibile stabilire la sua grandezza?

LA SUPERTERRA
Così gli scienziati vanno a caccia dei pianeti simili al nostro

SCIENCE WORLD FOCUS DOMANDE E RISPOSTE N.9 - BIMESTRALE - 9,90 €

9 772239 716359 70009

P.I. 17-08-17 SETTEMBRE/OTTOBRE